www.engstroy.spb.ru

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

№8(18) ноябрь-декабрь 2010

СОБЫТИЯ

РАСЧЕТЫ

МАТЕРИАЛЫ

КОНСТРУКЦИИ

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

ТЕМА НОМЕРА: ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
Ватин Николай Иванович

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Инженерно-строительный факультет

Кафедра «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС)

Международные магистерские программы по направлению «Строительство»

Что такое магистратура?

- получение квалификации, признанной во всем мире;
- фундаментальное профессиональное образование;
- ускоренный путь к получению степени кандидата технических наук;
- получение знаний и умений, востребованных работодателями на производстве и в науке;
- реальное участие в научно-исследовательской и педагогической деятельности.

Обучение в магистратуре проходит в течение 2 лет, на бюджетной или контрактной основе, по очной или заочной форме. Иногородним предоставляется общежитие.

Выберите одну из наших магистерских программ:

1. Автоматизированное проектирование зданий и сооружений
2. Инженерные системы зданий и сооружений
3. Организация и управление инвестиционно-строительными проектами
4. Теория и практика организационно-технологических решений
5. Энергосбережение и энергоэффективность (при финансовой поддержке ЕС)
6. Международные инвестиционно-строительные проекты (при финансовой поддержке ЕС)

Обучение в ведущих европейских вузах

Каждому магистру предоставляется возможность бесплатной стажировки (от 1 семестра до года) в одном из европейских строительных вузов-партнеров ГОУ СПбГПУ.

Особенности обучения на кафедре:

- индивидуальная работа с каждым магистром, включающая активную научно-исследовательскую работу и опыт педагогической деятельности;
- регулярные выступления на семинарах, конференциях, научных форумах;
- активное взаимодействие преподавателей и студентов в ходе совместной проектной и научно-исследовательской деятельности;
- оперативное обновление учебных дисциплин;
- учебный процесс, построенный на современных компьютерных технологиях в строительстве;
- постоянное общение с представителями ведущих строительных и проектных организаций.

Заочная магистратура как второе высшее образование

Программа ориентирована, прежде всего, на обучение практикующих специалистов, в том числе с техническим «нестроительным» образованием:

- возможность обучения без отрыва от работы;
- использование новейших технологий дистанционного обучения;
- самостоятельный выбор приоритетных направлений обучения.

Контакты

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204, 301, 201
297-59-49, 535-79-92, 552-94-60, www.stroikafedra.spb.ru

Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском.

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 204

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Литературный редактор:

Ирина Ипполитовна Смирнова

Редакционный совет:

Академик РАН, д.т.н., проф., президент ГОУ СПбГПУ Ю.С. Васильев;
Член-корр. РАН, д.т.н., проф., проректор ГОУ СПбГПУ по научной и инновационной деятельности А.И. Рудской;
Д.э.н., проф., директор Санкт-Петербургского союза строительных компаний «Союзпетрострой» Л.М. Каплан;
Д.э.н., проф. ГОУ СПбГПУ, генеральный директор группы ЛСР А.И. Вахмистров;
Д.т.н., проф., декан ИСФ ГОУ СПбГПУ А.И. Альхименко;
Д.т.н., проф., зав. каф. ТОЭС ГОУ СПбГПУ Н.И. Ватин
и другие. Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 1000 экз.

Контакты:

Тел. 297-59-49
E-mail engstroy@inbox.ru
Http://www.engstroy.spb.ru

Содержание

СОБЫТИЯ
Теплофизика ограждающих конструкций 2
Ограждающие конструкции на Неделе науки 4

КОНСТРУКЦИИ
Горшков А.С., Попов Д.Ю., Глумов А.В. Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности 5
Солощенко С.С. Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада 10

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
Самарин О.Д., Зайцев Н.Н. Влияние ориентации остекленных фасадов на суммарное энергопотребление жилых зданий 16
Кривошеин А.Д., Федоров С.В. К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций 21

МАТЕРИАЛЫ
Бабков В.В., Кузнецов Д.В., Гайсин А.М., Резвов О.А., Самофеев Н.С., Морозова Е.В. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения 28
Коломийцев Д.Е., Родичева А.О., Рыбаков В.А. Огнестойкость междуэтажного перекрытия на основе стальных С-образных профилей 32

РАСЧЕТЫ
Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде SCAD Office 38
Абдикаримов Р.А., Жгутов В.М. Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих изотропных пластин и оболочек гладко-переменной толщины (асимметричные случаи) 47

При перепечатке ссылка на издание обязательна

На обложке: строительство высотного здания в г. Дубай (Объединенные Арабские Эмираты)

Теплофизика ограждающих конструкций

9 декабря 2011 г. в Ленэкспо прошла III Всероссийская научно-техническая конференция «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий». Конференция проходила в рамках II международного конгресса «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий».

В ситуации, когда повышение энергоэффективности экономики стало государственной задачей, тематика конференции становится все более актуальной. Тем не менее, традиционно специалисты в области строительной теплофизики рассматривают государственные программы повышения энергосбережения в строительстве критически. Так, все участники конференции сошлись в том, что дальнейшее повышение нормативного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций нецелесообразно. При этом на государственном и региональном (например, в Москве) уровнях постоянно производятся попытки такого повышения.

Все же, по сравнению с прошлогодней конференцией (см.: Энергоэффективность зданий и строительная теплофизика // Инженерно-строительный журнал, №8, 2009) специалисты в области строительной теплофизики настроены более оптимистично. В первую очередь, это связано с тем, что идет разработка нового СНИП взамен 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». Об основных планирующихся изменениях в документе на конференции докладывал Владимир Геннадьевич Гагарин, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Строительной теплофизики НИИСФ РААСН.

По словам В.Г. Гагарина, главными целями переработки СНИП являются:

- актуализация в соответствии с действующим законодательством, прежде всего, с ФЗ №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» от 23.11.2009;
- обновление устаревших методик расчета;
- гармонизация с западными нормами.

Основным достижением в новой редакции СНИПа является признание того, что теплопотери через стены составляют малую долю общих теплопотерь зданий (по разным данным, от 9% до 12%). Поэтому основное внимание при теплозащите зданий следует уделять таким системам здания как горячее водоснабжение (47%) и вентиляция (31%). В связи с этим в новом СНИП решено принять минимальные требования по теплозащите ограждающих конструкций, а затем каждый регион будет иметь возможность установить собственные требования в соответствии с местными климатическими и другими условиями.

Что касается удельного сопротивления теплопередаче, в качестве минимальных требований будет принят так называемый «потребительский подход» из современной редакции СНИП. В соответствии с ним можно было сократить удельное сопротивление теплопередаче (для стен умножить требуемое на 0,63), если выполнялись требования по расходу теплоты на отопление. В новой редакции эти требования становятся обязательными, поэтому и требуемое сопротивление теплопередаче сокращается автоматически.

В.Г. Гагарин выделил в качестве одной из целей изменения СНИП внесение ясности в терминологию. В том числе, введены новые определения приведенного сопротивления теплопередаче, энергетической эффективности. Введено понятие удельной теплозащитной характеристики здания (вместо удельной тепловой характеристики). Особенность этого показателя в том, что он учитывает форму здания: все декоративные выступы, эркеры, которые значительно повышают теплопотери. В предыдущей версии СНИП это никак не учитывалось (см. об этом в статье А.Д. Кривошеина и С.В. Федорова на стр. 21).

Также в новой редакции норматива будет приведена четкая методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче. Она, в том числе, гармонизирована с немецкими стандартами DIN – в них расчет ведется по тому же принципу.

Другим последствием принятия закона 261-ФЗ является необходимость оценки энергоэффективности зданий. Каждое вновь построенное здание должно будет получить энергетический паспорт и один из пяти классов энергоэффективности. Разработке такой системы оценки был посвящен доклад Анатолия Ивановича Тютюнникова, к.т.н., доцента, ведущего специалиста отдела развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербург ОАО «Газпром промгаз».

А.И. Тютюнников проанализировал зарубежные рейтинговые системы оценки зданий, в том числе немецкие системы BREEM и LEED. В них преобладают санитарно-гигиенические и экологические компоненты, а не аспекты энергоэффективности. В то же время, многие элементы в текущих российских нормах

регламентируются значительно более жестко, чем в зарубежных (например, требования к восстановлению зеленых насаждений). Существует уже и российский аналог – Российская рейтинговая система оценки качества зданий, разработанная президентом НП «АВОК» Юрием Андреевичем Табунщиковым. В ней уже 29% критериев оценки являются количественными, что, с точки зрения докладчика, показывает положительную динамику. Тем менее, комплексной системы оценки энергоэффективности зданий в России пока нет.

Методологии расчета энергоэффективности зданий был посвящен и доклад к.т.н., доцента, заведующего лабораторией экологии и акустики ОАО «ЛЕННИИПРОЕКТ» Анатолия Петровича Кочнева. По его мнению, в методике расчета должны учитываться как минимум следующие элементы:

- теплопроводность строительных материалов и конструкций;
- форма и расположение здания;
- мостики холода;
- расположение окон и, соответственно, теней;
- система вентиляции и воздухопроницание.

Оценка теплопроводности строительных материалов является особым вопросом. В своем докладе Николай Александрович Соколов, д.т.н., руководитель лаборатории теплофизических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» рассказал о сложностях такой оценки с точки зрения метрологии. Так, до последнего времени в мире не существовало эталона теплопроводности. Использовать для этого теплоизоляционные материалы невозможно, т.к. тепло в них передается, например, еще и конвективными потоками. Кроме того, теплофизические свойства этих материалов меняются с течением времени, что также не способствует их использованию в качестве эталона.

В 2004 г. российскими учеными была изобретена многозначная мера теплопроводности – теплостат. Это система тел, приобретающая в определенных условиях определенную теплопроводность. Сейчас этот эталон проходит испытания и международную сертификацию.

Что касается текущей ситуации, Н.А. Соколов отметил, что сегодня 85% теплоизоляционных материалов не соответствует собственным техническим условиям, в том числе потому, что неправильно определяется теплопроводность.

Д.т.н., профессор, декан факультета инженерно-экологических систем ГОУ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ) Тамара Александровна Дацюк свое выступление посвятила также методике оценки тепловых характеристик, но уже удельной тепловой характеристики здания в целом. Для этого в ГОУ СПбГАСУ применяется как численное моделирование, так и испытания конструкций в климатической камере.

Об испытаниях в климатической камере рассказывал и Дмитрий Владимирович Крайнов, ассистент ГОУ Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Его выступление на конференции было посвящено влажностному режиму ограждающих конструкций (статью С.С. Солощенко на эту тему см. на стр. 9).

Необходимо помнить, что, помимо непосредственно стен, ограждающие конструкции зданий включают также окна, обладающие своими теплотехническими характеристиками. О ситуации в этой сфере на конференции рассказала Александра Юрьевна Куренкова, директор НИУПЦ «Межрегиональный институт окна». В соответствии с Приказом Минрегионразвития №262, конкретизирующим 261-ФЗ, удельное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций должно повыситься до 0,8 $м^2 \cdot °С/Вт$. Пока что, по словам А.Ю. Куренковой, мало кто из производителей и застройщиков обращает внимание на эту цифру. Тем не менее, современные конструкции позволяют достичь такого показателя, в основном за счет оконных профилей, т.к. возможности непосредственно стекла в повышении энергосбережения на данный момент практически исчерпаны. Поэтому для повышения сопротивления теплопередаче окон используются новые материалы профилей, а также новые конструкции стеклопакетов.

В этом номере журнала опубликованы статьи по всем основным темам, затронутым на конференции: от расчета сопротивления теплопередаче стен до теплотехники светопрозрачных конструкций.

В.М. Якубсон

Ограждающие конструкции на Неделе науки

Конференция «Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий» (см. предыдущий материал) включала и второй день, который проходил в ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ). Этот день одновременно являлся одним из заседаний секции XXXIX международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ» под названием «Энергоэффективные ограждающие конструкции».

Неделя науки – это ежегодная конференция, в которой участвуют студенты, аспиранты и преподаватели ГОУ СПбГПУ, а также других вузов Санкт-Петербурга и России. В 2010 г. на кафедре «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС) Неделя науки проходила в трех секциях: «Промышленные и гражданские здания и сооружения, несущие и ограждающие конструкции», «Инженерные системы зданий и сооружений» и «Технология, организация и управление в строительстве».

На упомянутой подсекции «Энергоэффективные ограждающие конструкции» рассматривались различные аспекты энергоэффективности зданий. Много внимания было уделено теплотехническим свойствам различных строительных материалов: каменной ваты и стекловолокна (см.: Бердюгин И.А. Теплоизоляционные материалы в строительстве. Каменная вата или стекловолокно: сравнительный анализ // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №1. – С. 26–31); газобетона (см.: Пинскер В.А., Вылегжанин В.П., Гринфельд Г.И. Теплофизические испытания фрагмента кладки стены из газобетонных блоков марки по плотности D400 // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №8. – С. 17–19).

Несколько работ магистров кафедры ТОЭС, доложенных на конференции, были выполнены в рамках международного проекта TEMPUS по программе «Энергоэффективность и энергосбережение». По условиям проекта над одной темой работали совместно студенты технического (СПбГПУ) и экономического (СПбГУЭФ) вузов. Поэтому данные исследования касались, в первую очередь, экономической оценки энергосбережения в строительстве (об этом см.: Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №1. – С. 9-13).

Докладчики уделили внимание и популярной сегодня системе навесных вентилируемых фасадов (НВФ). Известно, что НВФ имеют различные недостатки как с точки зрения теплотехнических свойств, так и с точки зрения долговечности. Докладчиками предлагались различные пути разрешения этой проблемы: студентка 3 курса Дарья Викторовна Немова рассматривала вопрос об увеличении слоя теплоизоляции в вентилируемом фасаде; студент 4 курса Дмитрий Юрьевич Попов, напротив, предлагал конструктивное изменение системы (статью об этом см. на стр. 5).

Как известно, в ограждающих конструкциях, наряду с традиционными, используются и альтернативные материалы. Одним из таких материалов являются легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК). Характеристикам, расчету и методам использования легких стальных профилей была посвящена отдельная подсекция на Недели науки СПбГПУ. Одной из важных характеристик ограждающих конструкций является их огнестойкость. Оценке этого свойства ограждающих конструкций из ЛСТК был посвящен один из докладов. Статья по его материалам опубликована на стр. 32.

В целом, тематике ограждающих конструкций на Неделе науки СПбГПУ было уделено много внимания. Поднималась эта тема и в других секциях, таких как «Технология, организация и управление в строительстве». Сегодня по этой тематике на кафедре ТОЭС готовятся несколько магистерских работ, одна кандидатская и одна докторская диссертация.

В.М. Якубсон

Конструктивное исполнение вентилируемого фасада повышенной надежности

К.т.н., докторант А.С. Горшков*;
студент Д.Ю. Попов,
ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
проект-менеджер А.В. Глумов,
ООО «Н+Н»

В последние 5-8 лет при проектировании ограждающих конструкций жилых многоэтажных монолитно-каркасных зданий в подавляющем большинстве случаев применяются следующие конструктивные решения стен:

- конструкция вентилируемого фасада;
- конструкция ограждения с тонким штукатурным слоем по слою утеплителя на несущей основе (бетон, кирпичная или газобетонная кладка);
- кладка стен из газобетонных блоков с облицовочным слоем из керамического или силикатного кирпича.

Существует ряд иных решений конструктивного исполнения ограждающих конструкций зданий, как например колодцевая кладка с заполнением пространства между внутренним и наружным слоем ограждения монолитным пенобетоном, а также ряд других инженерных решений, суммарная относительная доля которых не столь значительна по сравнению с перечисленными ранее.

Большое распространение в настоящее время получило конструктивное решение вентилируемого фасада. Первоначально конструкция вентилируемого фасада предполагалась в качестве конструктивного фасадного решения, защищающего стены зданий от перегрева в жаркий (значительно инсолируемый) период эксплуатации. Данное конструктивное решение, по сути, представляло собой лишь экран: укладка в вентилируемое пространство стенового ограждения теплоизоляции не предусматривалась. И только спустя некоторое время, по мере продвижения данного конструктивного решения в северные широты, стала применяться конструкция фасада с утеплителем в вентилируемом пространстве ограждения.

Не лишенная недостатков ввиду сложности проведения монтажных работ и большого количества составных элементов (т.е. характеризующаяся высокими требованиями к конструктивной и технологической надежности), конструкция вентилируемого фасада имеет ряд неоспоримых преимуществ, а именно:

- возможность использования (монтажа) как в многоэтажном (основной сегмент применения), так и в малоэтажном строительстве;
- широкий ассортимент разнообразных по цене и цветовому исполнению облицовочных материалов (керамогранит, цементно-стружечная плита, стеклопластиковые и композитные панели);
- эстетичный внешний вид;
- эффективная защита утеплителя от увлажнения (при правильном проектировании и соблюдении технологических требований к проведению монтажных работ);
- значительные (но не неограниченные) возможности повышения уровня теплозащиты стен;
- ремонтопригодность (возможность проведения капитального ремонта фасада после определенного срока эксплуатации);
- высокая конкуренция среди производителей и поставщиков.

Помимо прочего, данное конструктивное решение можно назвать нехарактерным, но от этого не теряющим возможности употребления, термином «модное», что также можно отнести к его конкурентным преимуществам. На любом рынке, в том числе на строительном, существует «мода» на определенные конструктивные решения. Так и в настоящее время существует «мода» на вентилируемые фасады, и она может длиться не один сезон.

Как уже указывалось ранее, данное конструктивное решение имеет ряд недостатков. Не останавливаясь подробно на их подробном перечислении, следует выделить следующие из них [1]:

- высокая трудоемкость при выполнении монтажных работ;
- высокая стоимость;
- непрогнозируемая в заданных условиях эксплуатации долговечность (эксплуатационный срок службы) применяемых в конструкции фасада теплоизоляционных материалов.

Конструкция вентилируемого фасада в своем традиционном исполнении состоит из следующих слоев (перечисляются по мере следования от внутренней поверхности стенового ограждения к наружному):

- несущей основы, в качестве которой могут выступать бетонное основание, кирпичная или газобетонная кладка;
- теплоизоляционного слоя, прикрепленного посредством химических и (или) механических связей (анкеров) к несущей основе;
- экрана (собственно, конструкции вентилируемого фасада), состоящего из направляющих профилей, кронштейнов, крепежных элементов, облицовочных плит или панелей и ряда других дополнительных, но не менее от этого важных, элементов.

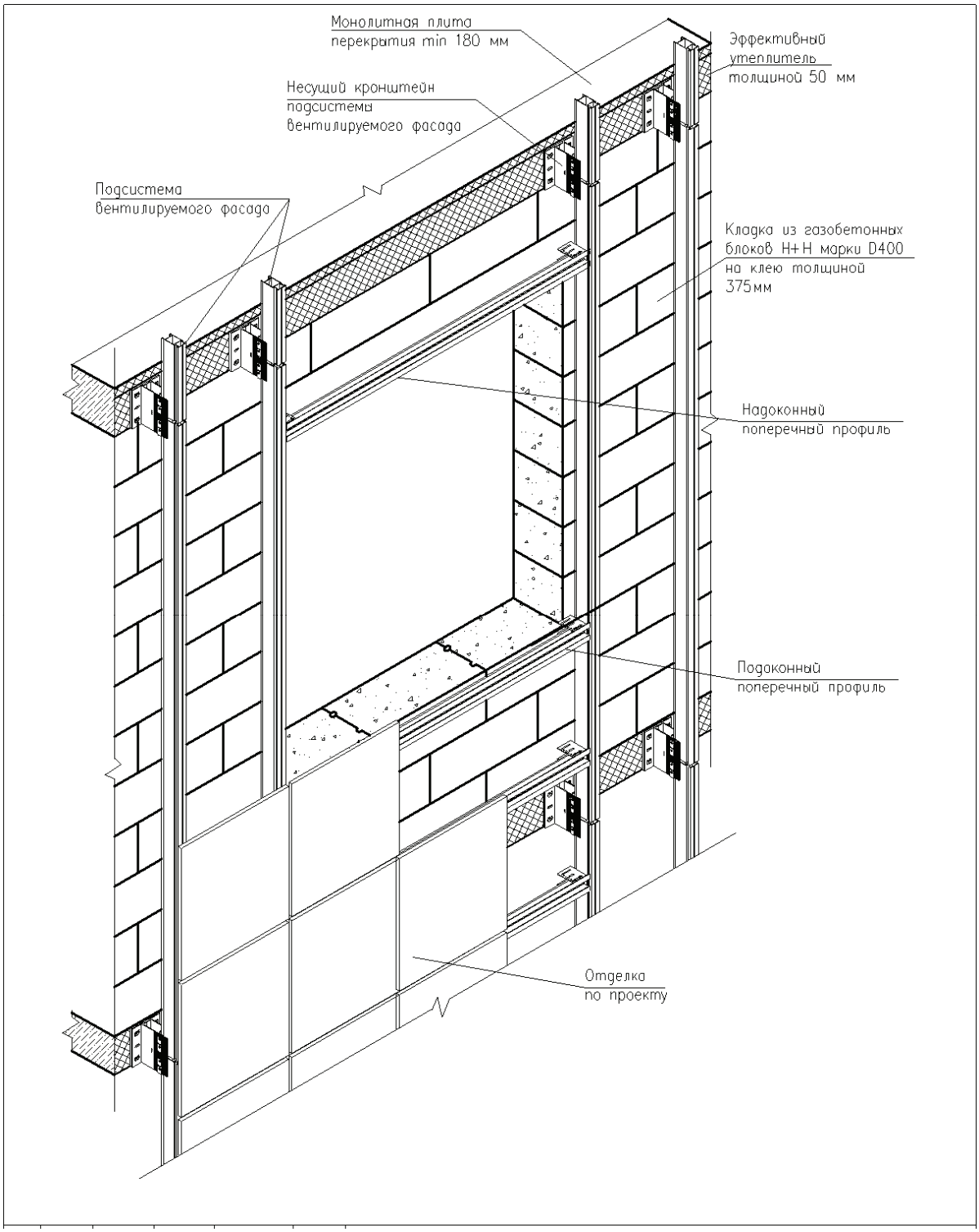


Рисунок 1. Общий вид предлагаемого конструктивного решения фасада

В качестве дополнительных слоев в конструкции вентилируемого фасада помимо перечисленных могут присутствовать также слой пароизоляции (для защиты от водяного пара, диффундирующего через ограждение со стороны помещения) и ветрозащитный слой (для защиты утеплителя от выветривания волокон в вентилируемом зазоре).

Таким образом, конструкция вентилируемого фасада представляет собой многослойное конструктивное решение. С точки зрения теории надежности вероятность безотказной работы многослойной конструкции равна произведению вероятностей безотказной работы каждого ее слоя или элемента [2]. На практике это означает, что выход из работоспособного состояния (отказ) какого-либо одного конструктивного слоя оказывает существенное влияние на надежность всей системы в целом (нарушает условия ее нормальной эксплуатации). Например, отсутствие облицовочного элемента приводит к возможности увлажнения утеплителя осадками и, как следствие, снижению его теплозащитных показателей. Таким образом, априори из теории надежности вытекает следующее следствие: чем меньше слоев, а также конструктивно связанных между собой элементов, будет в составе конструкции стены, тем более высокими показателями надежности она будет обладать.

В настоящей работе предлагается конструктивное решение стены, позволяющее уменьшить количество слоев и, как следствие, повысить надежность всей конструкции стены, а также существенно снизить ее себестоимость. Достигается это за счет следующего инженерного решения (рис. 1). Известно, что однородная однослойная стена, составленная из газобетонных блоков марки по плотности D400 (при коэффициенте теплопроводности $\lambda_Б$= 0,117 Вт/м·°С [2], т.е. в условиях эксплуатации «Б»), обеспечивает не только минимально допустимые СНиП 23-02 [4] значения требуемых показателей сопротивления теплопередаче (R_{min}=1,94 м^2·°С/Вт, – потребительский подход к нормированию уровня теплозащиты, – показатели «б» и «в» требований), но и значения требуемого сопротивления теплопередаче по предписывающему подходу (R_{req}=3,08 м^2·°С/Вт, – показатели «а» и «б» требований СНиП 23-02 [3]).

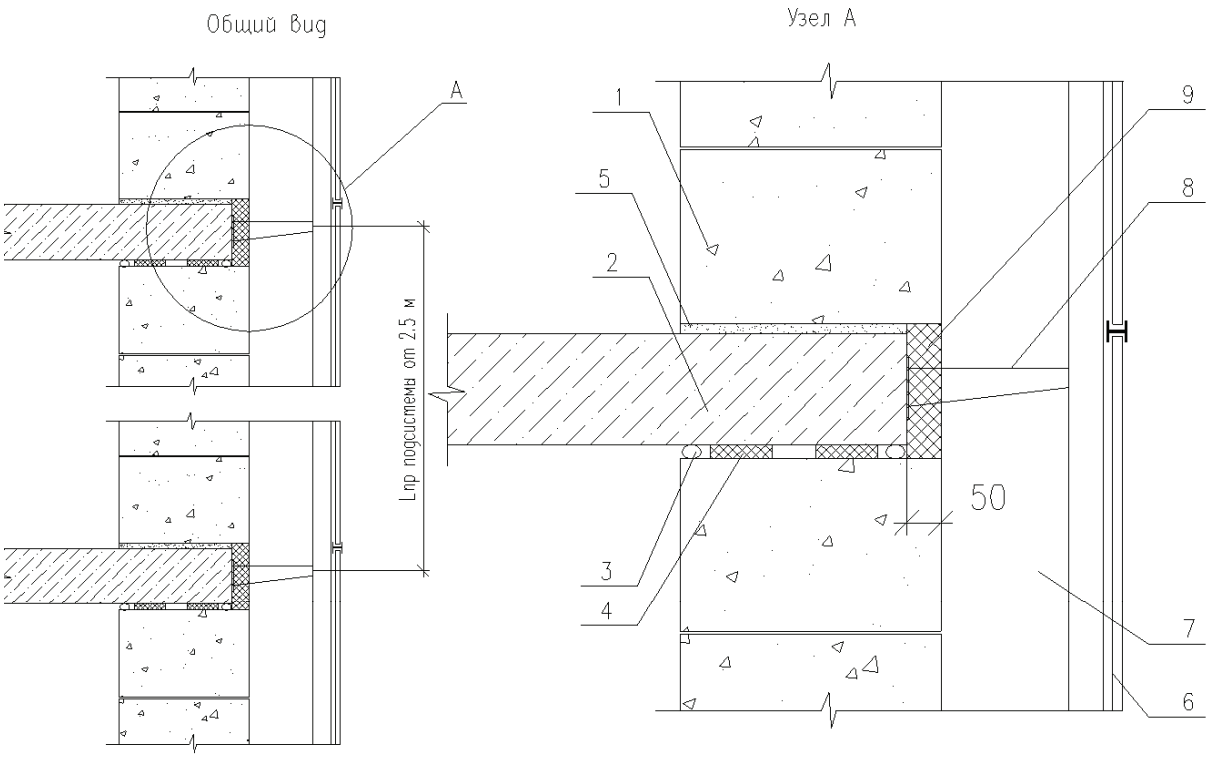
Применение газобетонной кладки в конструкции вентилируемых фасадов ограничено минимальными требованиями к плотности и прочности блоков. Для обеспечения требуемых значений вырывающих усилий требуется применение кладки из блоков марки по плотности D500 [5]. Однослойная однородная кладка из блоков данной марки (D500) не обеспечивает необходимые параметры теплозащиты или требует сравнительно большой толщины стен (порядка 450 мм при коэффициенте теплопроводности $\lambda_Б$=0,147 Вт/м·°С [3]).

В то же время сегодня на рынке систем вентилируемых фасадов существуют системы с шагом профиля протяженностью 3 м и более. Среди наиболее известных торговых марок, имеющих подобные сертифицированные системы, следует отметить U-kon, OLMA, Newton. Данное конструктивное решение позволяет закрепить основные кронштейны подсистемы непосредственно в диски монолитного перекрытия. Дополнительно, с целью увеличения изгибной жесткости направляющего профиля, требуется установка промежуточных фахверковых кронштейнов в подоконном и, возможно, надоконном участках стены. Для данных участков требуются меньшие вырывающие усилия на анкер, чем для несущих кронштейнов, закрепляемых в диски монолитных плит. Таким образом, для данного конструктивного решения могут быть применены газобетонные блоки марки по плотности D400. Требуемые параметры теплозащиты (R_{req}=3,08 м^2·°С/Вт) в этом случае обеспечит толщина 375 мм – стандартная для большинства производителей.

Открытые диски монолитных перекрытий для данного конструктивного решения представляют собой слабое с точки зрения теплотехнической однородности место. Поэтому кладку стен из газобетона предлагается вести «на выносе» (глубиной 50÷75 мм), что допустимо при поэтажном опирании стен на монолитные перекрытия (рис. 2). Образующийся при этом просвет между разноэтажными стенами рекомендуется закрывать эффективным минераловатным утеплителем с соответствующей глубине просвета толщиной.

В целом, предлагаемое конструктивное решение обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным исполнением вентилируемых фасадов, а именно:

- не требует дополнительного утепления, что определяет его более низкую себестоимость;
- обладает высокими противопожарными показателями (так как стены из газобетонных блоков имеют степень огнестойкости не менее REI 240);
- имеет более высокую надежность (ввиду уменьшения количества слоев в конструкции наружного стенового ограждения) и долговечность;
- обладает более высокой теплотехнической однородностью (практически отсутствуют сквозные теплопроводные включения или их влияние значительно уменьшено);
- менее трудоемко в процессе производства монтажных работ (монтаж стен из блоков и монтаж фасада можно выполнять независимо);
- не требует проведения последующих работ по замене утеплителя.



Примечания

1 – Кладка из газобетонных блоков Н+Н марки D400 на клею;
2 – Монолитная (сборная) железобетонная плита;
3 – Пороизол (гернит);
4 – Минеральная вата;
5 – Раствор М35;
6 – Подсистема вентилируемого фасада;
7 – Воздушный зазор;
8 – Несущий кронштейн подсистемы вентилируемого фасада;
9 – Утеплитель толщиной 50 мм.

Рисунок 2. Разрез предлагаемого технического решения

Литература

1. Ватин Н.И., Немова Д.В. НВФ: основные проблемы и их решения // Мир строительства и недвижимости. – 2010. – №36. – С. 2–4.
2. Колотилкин Б.М. Проблемы долговечности и надежности жилых зданий. – М.: Изд-во «Знание», 1969. – 46 с.
3. ГОСТ 31359-2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия.
4. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
5. СТО «Анкерные крепления для фасадных систем». Изд. 4-е. – М.: Ассоциация «Наружные фасадные системы», 2007. – 46 с.

**Александр Сергеевич Горшков, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(921) 388-43-15; эл. почта: alsgor@yandex.ru

H+H
упрощаем строительство
H+H
www.HplusH.ru

Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада

Генеральный директор С.С. Солощенко*,
ООО «Стакковент»

Постоянный рост цен на тепловую и электрическую энергию, наблюдаемый в последние годы, делает особенно актуальной проблему эффективной теплозащиты ограждающих конструкций зданий с целью экономии энергетических ресурсов. В последнее время наибольшую популярность получили навесные фасадные системы. Наиболее распространенные среди них – вентилируемые фасады с облицовкой на относе и штукатурные фасады. У каждого вида фасадных систем имеются как положительные, так и отрицательные особенности.

Основной проблемой систем наружного утепления фасадов является вопрос долговечности. Главным фактором, влияющим на указанный показатель, является влажностный режим конструкции, а точнее способность многослойной конструкции противостоять чрезмерному увлажнению материалов, входящих в нее. Благоприятный влажностный режим определяет способность многослойной конструкции эффективно удалять влагу, проникающую в виде водяного пара из помещения наружу, предотвращая переувлажнение всех слоев конструкции. В современных системах утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки используются специальные паропроницаемые штукатурные составы, которые частично решают проблему выведения влаги. Тем не менее, наружный защитно-декоративный штукатурный слой имеет относительно высокий коэффициент сопротивления паропроницанию, поэтому поток пара, проходящий через утеплитель, не может полностью покинуть конструкцию и будет накапливаться на границе штукатурного и теплоизоляционного слоев.

При повышенной влажности материала ухудшается ряд его характеристик. Под воздействием погодных условий, с повышением влажности снижается его устойчивость к трещинообразованию, возникающему в результате замораживания-оттаивания материала. Это происходит вследствие изменения геометрических размеров материала при его увлажнении и замораживании, что приводит к избыточным напряжениям в штукатурном слое. Ухудшение перечисленных характеристик в целом приводит к снижению долговечности и теплозащитных функций традиционной фасадной конструкции с применением тонкослойной штукатурки [1].

В рамках представленной статьи рассматривается новая для российского рынка технология утепления и отделки фасадов зданий – навесной вентилируемый штукатурный фасад. Суть технологии заключается в применении в штукатурной системе наряду с традиционными материалами (минеральной ватой, тонкослойной штукатуркой и пр.) инновационного материала – фасадного мата «Стаккодрейн», который обеспечивает непрерывный вентилируемый воздушный зазор под защитно-декоративным слоем штукатурки.

В статье рассматривается влияние воздухопроницаемости создаваемой прослойки на влажностный режим конструкции. Полученная при расчете влажность материалов оцениваемой конструкции сравнивается с влажностью материалов обыкновенного штукатурного фасада.

Расчетные характеристики климата и микроклимата помещений здания

Основными параметрами климатического района строительства являются средняя температура и относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца. В данной работе рассматривается не конкретное строящееся здание, а экспериментальная конструкция фасада, поэтому климатические параметры района строительства выбираются из соображений наибольшей общности. Все расчеты проводятся для климатических параметров Москвы и схожих по климатическим параметрам областей. В основном это области европейской части РФ, отличающиеся наиболее плотным заселением (Владимирская обл., Волгоградская обл., Республика Карелия, Ленинградская обл., Московская обл., Мурманская обл., Нижегородская обл., Новгородская обл., Псковская обл., Тверская обл. и другие).

В расчетах климатические параметры района строительства принимаются по СНиП 23-01-99 [2] для Москвы. Эти параметры имеют следующие значения:

- средняя температура наиболее холодного месяца $t_н$ = -10,2 °С;
- средняя относительная влажность наиболее холодного месяца $\varphi_н$ = 87%;
- средняя температура отопительного периода $t_{от}$ = -3,1 °С;
- продолжительность отопительного периода $z_{от}$ = 214 сут.

Основными расчетными параметрами микроклимата помещения являются температура и относительная влажность внутреннего воздуха. В помещениях исследуемого здания по проекту принимается $t_в$=20 °С, $\varphi_в$=55%. Точка росы для данных параметров внутреннего воздуха составляет $t_{т.р.}$=10,7 °С.

На основании климатических характеристик района строительства и микроклимата помещения рассчитывается величина градусо-суток отопительного периода:

$$ГСОП=(t_в-t_{от})\times z_{от} = 23,1\times214=4943\ ^oC\times сут.$$

Описание исследуемых ограждающих конструкций

В качестве базовой конструкции определена традиционная система утепления фасадов с применением тонкослойной штукатурки, отличающаяся от оцениваемой конструкции отсутствием вентилируемой прослойки под штукатурным слоем. Характеристики материалов (табл. 1) приняты по СП 23-101-2004 (Приложение Д) [3].

Таблица 1. Состав стены изнутри наружу

№ слоя	Материал	Толщина слоя, δ, м	Теплопроводность, $\lambda_Б$, Вт/м·°С
1	Штукатурка цементно-песчаным раствором	0,02	0,93
2	Кирпичная кладка	0,25	0,81
3	Минераловатная плита	0,15	0,045
4	*Фасадный мат «Стаккодрейн» (оцениваемая конструкция)*	*0,04*	-
5	Наружная штукатурка сложным раствором	0,009	0,87

Расчет влажностного режима исследуемых конструкций

Расчет влажностного режима конструкций по стационарным условиям является ориентировочным и не отражает действительной картины изменения влажности материала в ограждении вследствие того, что процессы диффузии водяного пара протекают медленно. Метод, изложенный в СНиП 31-02-2003 «Тепловая защита зданий» [4], учитывает только перенос пара из помещений и не учитывает возможность накопления и перераспределения пара в конструкции. Для адекватного исследования влажностного режима конструкций применен метод последовательного увлажнения, основанный на численном решении уравнения влагопереноса, учитывающего перенос как пара, так и жидкой влаги, а также инерционность конструкции.

Для систем наружного утепления и отделки фасадов зданий с применением тонкослойных штукатурок основным критерием качества влажностного режима является влажность наружного штукатурного слоя. Для оцениваемой конструкции с вентилируемой прослойкой влажность штукатурного слоя определяется более сложно, так как на ней сказывается влияние переноса влаги в зазоре.

В качестве критерия допустимого увлажнения штукатурного слоя выбрана влажность, равная сумме расчетной влажности для условий эксплуатации Б ($W_Б$) и предельно допустимого приращения расчетного массового отношения влаги в материале $\Delta W_{ср}$. Для штукатурки $W_Б$=4 %, $\Delta W_{ср}$=5% (СНиП II-3-79, Приложение 3. Таблица 14) [5]. Таким образом, критической далее считается влажность штукатурки, равная 9% по массе.

При расчете нестационарного влажностного режима для обеих конструкций внутреннее сопротивление влагообмену было принято 0,02 м^2·ч·Па/мг. При расчете базовой конструкции наружное сопротивление влагоотдаче с учетом штукатурного слоя и его окраски было принято равным 0,3 м^2·ч·Па/мг.

Квазистационарный влажностный режим для базовой конструкции устанавливается через 2 года после начала эксплуатации здания. Максимальная влажность достигается слоем штукатурки в феврале и составляет 7,2% влажности по массе (при относительной влажности воздуха в порах материала, равной 100%). Максимальная влажность утеплителя составляет 2,8% влажности по массе (относительная влажность воздуха – 100%).

Максимальная влажность штукатурного слоя в базовой конструкции на 80% превышает максимальную сорбционную. Полученная влажность штукатурного слоя меньше критической влажности в 9% по массе. Такая конструкция формально удовлетворяет требованиям к влажностному режиму для данного класса ограждающих конструкций.

Для стены с наружным тонким штукатурным слоем и вентилируемой прослойкой расчет проводится до воздушной прослойки. Влияние вентилируемого зазора на конструкцию моделируется граничными условиями. В частности предполагается, что влажность воздуха в прослойке близка к 100% относительной влажности наружного воздуха. Поверхность утеплителя теплее наружного воздуха за счет влияния мата. Наружное сопротивление влагоотдаче (из утеплителя в прослойку) принято равным 0,04 м^2·ч·Па/мг. Квазистационарный влажностный режим конструкции устанавливается менее чем за 2 года после начала эксплуатации здания. Максимальная влажность достигается наружным слоем утеплителя в феврале и составляет 0,73% влажности по массе (относительная влажность воздуха 87%). Максимальная влажность меньше максимальной сорбционной. Влагонакопление в годовом периоде эксплуатации отсутствует. Поток водяного пара, приходящий в зимний период из конструкции к штукатурному слою, составляет $q_{вп}$=450 мг/(м^2·ч).

Влажностный режим исследуемых конструкций отличается лишь в зоне расположения вентилируемого зазора и штукатурного слоя. В остальном показатели влажностей материалов и удельные потоки водяного пара для обеих конструкций близки. [6]

Расчет воздухообмена в вентилируемой прослойке

В поперечном сечении фасадный мат «Стаккодрейн» представляет собой V-образный трехмерный профиль из полимерного материала, который образует вертикально ориентированные вентиляционные каналы. С наружной и внутренней стороны к нему прикреплена стеклотканевая мелкоячеистая сетка. Образующий профиль материал имеет определенную толщину, поэтому в расчетах принимаем прослойку неоднородной и с частичным заполнением.

Основной характеристикой воздухообмена в воздушной прослойке для расчета влагоудаления из прослойки является скорость движения воздуха. Поэтому методика по нахождению воздухообмена в прослойке при известных характеристиках геометрии и заполнении прослойки будет сводиться к нахождению скорости движения воздуха.

Расчет температуры и скорости движения воздуха в прослойке

Чтобы оценить характер движения воздуха в прослойке и диапазон проницаемостей, рассматривается два случая: первый – прослойка ничем не заполнена; второй – прослойка заполнена наиболее проницаемой минеральной ватой. Очевидно, что проницаемость не может быть выше, чем у незаполненной прослойки. Для второго случая хорошо известно (как из опыта, так и из расчетов), что проницаемость заполненной минеральной ватой прослойки недостаточна для вентилируемых фасадов.

Связь между скоростью движения воздуха в прослойке и перепадом давления отражает характер движения воздуха. Она описывается общей формулой:

$$\Delta P = kv^n \ (1)$$

ΔP – перепад давления, Па;

k – коэффициент пропорциональности, связанный с сопротивлением движению воздуха;

v – скорость движения воздуха, м/с.

Для незаполненной прослойки показатель степени n=2, для фильтрации воздуха через минеральную вату n=1. Только для самых проницаемых видов минеральной ваты показатель степени начинает увеличиваться. Так как проницаемости минеральной ваты совершенно недостаточно, а любые, пусть и малые сквозные каналы имеют показатель степени n=2, далее в расчете принимается, что n=2.

Для исследуемого случая движения воздуха по прослойке в зимний период под действием перепада температуры за счет подогрева прослойки теплом, пришедшим через стену, характерны небольшие градиенты давления. В расчетах для января такой градиент составит примерно 0,1 Па/м. Для наиболее проницаемых видов минеральной ваты, проходивших испытание в НИИСФ, скорость движения воздуха при градиенте давления 0,1 Па/м составит 0,0001 м/с. Для незаполненной прослойки описанной выше геометрии характерная скорость движения воздуха составляет 0,2 м/с. Дополнительные расчеты позволяют сузить диапазон проницаемостей прослойки для построения графиков. Диапазон выбирается таким образом, чтобы средняя скорость движения воздуха в прослойке составляла от 0,04 м/с до 0,2 м/с.

Проницаемость заполнения прослойки на графиках будет характеризоваться безразмерным коэффициентом m. Далее он называется коэффициентом сопротивления прослойки и определяется как отношение аэродинамического сопротивления заполненной и незаполненной прослоек.

Методики расчета температуры и скорости движения воздуха в вентилируемых воздушных прослойках с неперфорированным экраном на данный момент широко известны и применяются при расчетах навесных фасадов с облицовкой на относе. Расчет проводится методом последовательных приближений по формулам (2) и (3).

Скорость движения воздуха в воздушной прослойке определяется по формуле:

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{0{,}08h(t_{\text{ср}} - t_{\text{н}})}{m\xi_{\text{пр}} + \xi_{\text{гр}}}} \ (2),$$

где h – разность высот от входа воздуха в зазор до ее выхода из него, м;

$t_{ср}$, $t_н$ – средняя температура воздуха в зазоре и температура наружного воздуха, °С;

ξ_i- коэффициенты местных сопротивлений.

Средняя температура воздуха в воздушной прослойке определяется по формуле:

$$t_{\text{ср}} = t_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot \frac{x_0}{h} \cdot \left[1 - exp\left(-\frac{h}{x_0}\right)\right] \ (3),$$

где t_0 – предельная температура воздуха в прослойке, °С;
x_0 – условная высота, на которой температура воздуха в прослойке отличается от предельной температуры t_0 в e раз (e≈2,7) меньше, чем отличалась при входе в прослойку, м;
$t_в$ – температура внутреннего воздуха, °С.

Для выбранной геометрии прослойки и климатических параметров района строительства (средняя январская температура −10,2°С) по приведенной методике проведена серия расчетов вариантов с различной проницаемостью прослойки. Связь между коэффициентом сопротивления прослойки и скоростью движения воздуха приведена на графике (рис. 1).

Средняя температура воздуха в прослойке для большей части рассмотренного диапазона составила −8,2°С.

Так как проницаемость прослойки обеспечена созданием регулярных каналов в материале, заполняющем прослойку, расчет характеристик заполнения производится по графику на рис. 2. Под относительной площадью каналов понимается площадь каналов, приходящаяся на 1 квадратный метр сечения прослойки, измеренная в м^2 [6].

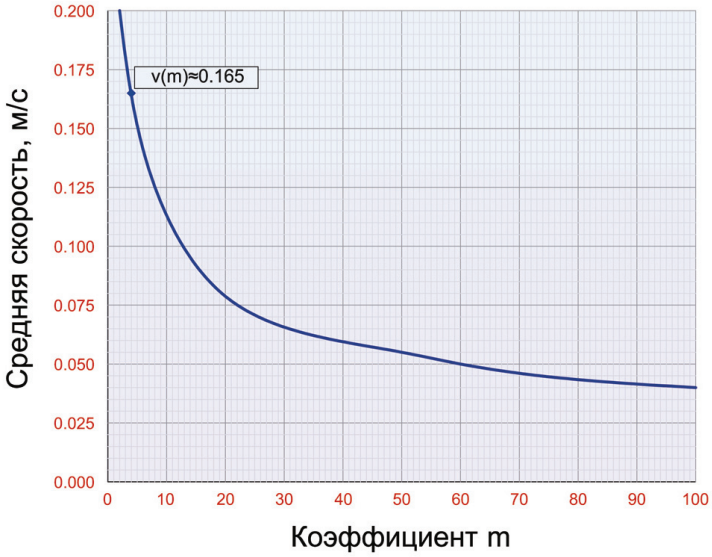


Рисунок 1. Связь между коэффициентом сопротивления прослойки и скоростью движения воздуха

Расчет площади вентиляционных каналов

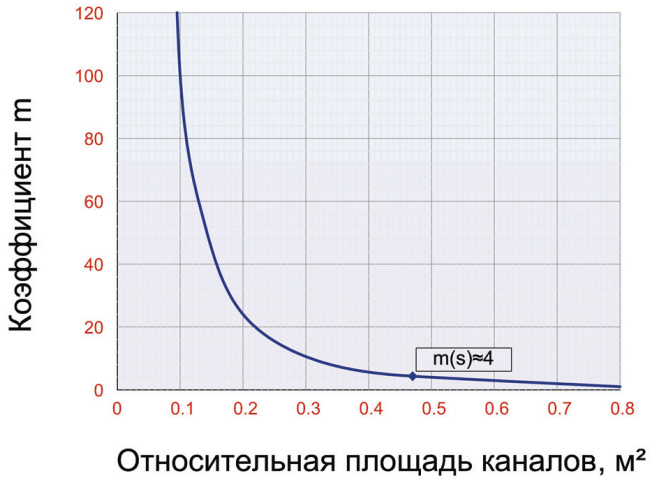


Рисунок 2. Связь между относительной площадью каналов и коэффициентом сопротивления прослойки

Для расчета относительной площади вентиляционных каналов примем, что на всей непрерывности прослойки высотой 10 м ни один из рядов матов не совпадает друг с другом, то есть на всем протяжении прослойки каналы располагаются с некоторым смещением по отношению друг к другу. Таким образом, зная среднюю толщину заполнения (≈0,5 мм), рассчитаем площадь каналов, которые при самом худшем стечении обстоятельств (несовпадении всех 10 рядов) будут оставаться открытыми.

Геометрия мата имеет следующие параметры: высота 1,0 м, ширина 1,0 м, толщина 0,04 м. Рассмотрим сегмент сечения мата площадью равной 0,04м х 0,04м = 0,0016м^2. Площадь заполнения в нем с учетом наложения рядов составляет 0.165м·0.0005м·10=0.000825м^2. Чистая площадь каналов составила 0.000775 м^2. При пересчете чистой площади на 1м^2 сечения прослойки, получаем 0.000775м^2·625=0.48м^2. Определим коэффициент m согласно полученному значению на графике на рис.2. и получим m=4.

Проверка насыщения воздуха в прослойке водяным паром

Влажность воздуха в воздушной прослойке, так же как и температура, распределены по высоте прослойки неравномерно. Поднимаясь, воздух постепенно насыщается водяным паром, и, начиная с некоторой высоты, возможно, не будет обеспечивать требуемого влагоудаления из утеплителя. Для предотвращения этого явления проводится расчет влажности воздуха на выходе из воздушного зазора в наиболее холодном месяце. Парциальное давление водяного пара на выходе из воздушной прослойки описывается формулой, аналогичной формуле (3):

$$e_{пр} = e_0 - (e_0 - e_н) \cdot \exp\left(-\frac{H}{x_1}\right) \quad (4),$$

где e_0 – давление водяного пара, к которому стремится воздух в прослойке, Па;
$e_н$ – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па;
x_1 – условная высота влагонасыщения воздуха в воздушной прослойке, м.

По формуле (4) построен график зависимости парциального давления водяного пара на выходе из прослойки от коэффициента сопротивления прослойки (рис. 3). Данная величина является расчетной. Если она превышает давление насыщенного водяного пара, то в прослойке начинается выпадение конденсата, а давление пара равняется насыщенному.

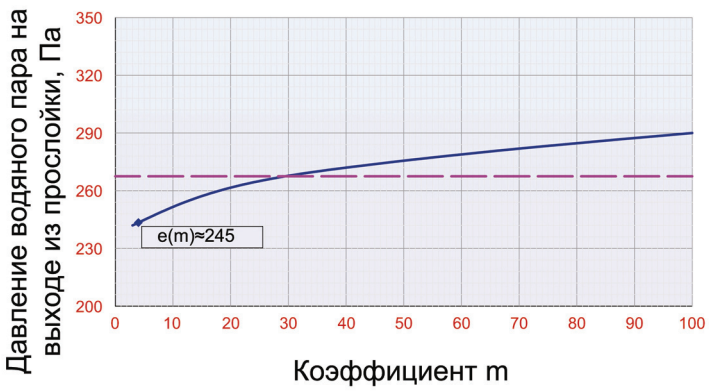


Рисунок 3. Зависимость расчетного парциального давления водяного пара на выходе из прослойки от коэффициента сопротивления прослойки. Пунктирной линией показано давление, при котором начинается выпадение конденсата

Основным критерием качества влажностного режима прослойки является высота начала выпадения конденсата $x_{крит}$. Она определяется по формуле:

$$x_{крит} \approx 28573 \cdot \frac{\upsilon \cdot d}{1+\frac{t_{пр}}{273}} \cdot \frac{E_н(1-\varphi_н)}{-k \cdot e_н + q_0^n} \quad (5),$$

где k – удельный поток водяного пара из конструкции в прослойку;
υ – скорость движения воздуха в прослойке;
d – толщина прослойки;
$t_{пр}$ – температура воздуха в прослойке;
$E_н$ – максимальное давление водяного пара;
$\varphi_н$ – относительная влажность наружного воздуха;
$e_н$ – парциальное давление водяного пара наружного воздуха;
q_0^n – поток пара.

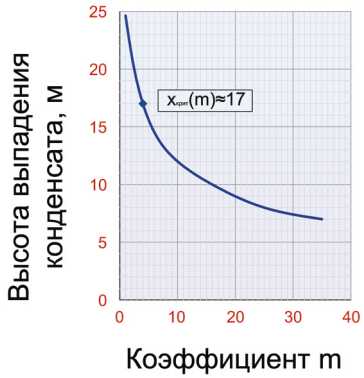


Рисунок 4. Зависимость высоты начала выпадения конденсата от коэффициента сопротивления прослойки

До этой высоты влажность штукатурного слоя в оцениваемой конструкции не должна превышать 4% влажности по массе, что обеспечивает намного более благоприятные условия эксплуатации, чем у обыкновенного штукатурного фасада (базовой конструкции), для которого максимальная влажность штукатурного слоя составила 7,2% влажности по массе.

По формуле (5) построен график (рис. 4) зависимости высоты начала выпадения конденсата от сопротивления прослойки.

Распределение влажности штукатурного слоя по высоте прослойки

На основании проведенных выше расчетов парциального давления водяного пара можно найти среднюю влажность штукатурного слоя. Влажность находится исходя из следующих предположений:

1) при давлении водяного пара в прослойке меньшем, чем давление насыщенного водяного пара, влажность штукатурного слоя определяется по кривой сорбции [7];
2) при давлении водяного пара в прослойке большем, чем давление насыщенного водяного пара, и потоке пара из прослойки в штукатурный слой, равном 435 Па, влажность штукатурного слоя принимается равной 7,2% – значению, полученному расчетом нестационарного влажностного режима для стены без вентилируемой прослойки;
3) промежуточные точки находятся аппроксимацией.

На рис. 5 показано распределение влажности штукатурного слоя по высоте прослойки. Из графика видно, что на всей протяженности непрерывной вентилируемой прослойки влажность штукатурного слоя не превышает максимальную сорбционную влажность.

Заключение

В работе рассмотрено влияние вентилируемой воздушной прослойки на свойства фасада с тонким штукатурным слоем. Такую прослойку обеспечивает инновационный материал – фасадный мат «Стаккодрейн» [8].

Проведен анализ влияния вентилируемой воздушной прослойки на влажностный режим стен со штукатурным фасадом. На примере стены с основанием из кирпичной кладки толщиной 250 мм и утеплением МВП 150 мм исследован нестационарный влажностный режим с вентилируемой прослойкой и без таковой.

По результатам расчетов было выявлено, что при использовании фасадных матов влажность штукатурного слоя значительно снижается по сравнению с базовой конструкцией (обыкновенным штукатурным фасадом).

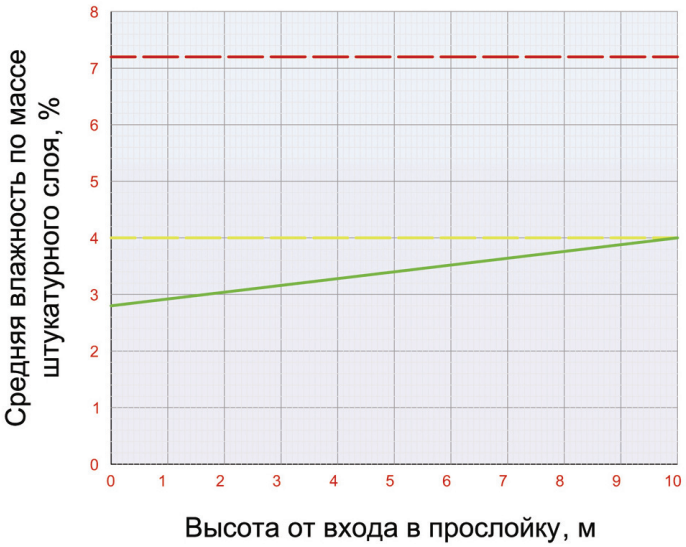


Рисунок 5. Зависимость средней влажности штукатурного слоя от высоты в прослойке. Желтая пунктирная линия показывает максимальную сорбционную влажность штукатурки, красная пунктирная линия показывает влажность штукатурки для базовой конструкции (без вентилируемого зазора)

Снижение влажности наружного штукатурного слоя приводит к повышению долговечности всей фасадной системы. На участках прослойки с влажностью штукатурного слоя, меньшей максимальной сорбционной, замораживание-оттаивание штукатурки в процессе эксплуатации практически не будет приводить к ее разрушению.

Создание вентилируемой прослойки под штукатуркой в штукатурном фасаде является новой и многообещающей технологией, которая позволит существенно повысить надежность и эксплуатационные качества фасадных систем с тонким штукатурным слоем.

Литература

1. Гагарин В. Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем. Температурно-влажностные воздействия и долговечность систем с тонким штукатурным слоем (По материалам статьи H. M. Künzel, H.Künzel, K. Sedelbauer «Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen», Bauphysik, 2006, Bd. 28, H. 3) // АВОК. 2007. №6. С. 82–90; №7 С. 66–74.
2. СНиП 23-01-99. Строительная климатология М., 2000.
3. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2004.
4. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита здания. М., 2004.
5. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника. – М., 1998.
6. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Расчет влияния фасадных матов «Стаккодрейн» на теплофизические характеристики стен с теплоизоляционной фасадной системой с тонким штукатурным слоем : Научно-технический отчет / НИИСФ РААСН. М., 2010.
7. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / Изд. 4-е, перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1973. 287 с.
8. Stuccovent. Компоненты системы. Фасадный мат STUCCODRAIN MF20PA [Электронный ресурс]. URL: http://stuccovent.ru/?page_id=113 (дата обращения: 07.12.2010).

** Сергей Сергеевич Солощенко, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7 (812) 334-79-43; эл. почта: sergey.soloschenko@stuccovent.ru

Влияние ориентации остекленных фасадов на суммарное энергопотребление жилых зданий

К.т.н., доцент О.Д. Самарин*;
аспирант Н.Н. Зайцев,
ГОУ Московский государственный строительный университет

Проанализируем характер зависимости энергопотребления жилыми зданиями массовой застройки от ориентации их остекленных фасадов по сторонам горизонта с точки зрения теплосбережения в холодный период (ХП) года, а также влияние такой ориентации на срок окупаемости применяемого комплекса энергосберегающих мероприятий.

Вычисления проводились для 2 наиболее характерных зданий-представителей в соответствии с современными типовыми и индивидуальными проектами с учетом их конструктивных характеристик в климатических условиях пяти городов, расположенных в различных регионах РФ, с расчетной температурой наружного воздуха $t_{н5}$, соответствующей средним условиям наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0.92: –3°С (Сочи); –25°С (Волгоград); –28°С (Москва); –39°С (Новосибирск); –42°С (Тында). Климатические характеристики для перечисленных населенных пунктов принимались по данным [1]. Стоимость теплоизоляционного материала считалась равной 1800 руб/м^2, а затраты на осуществление работ по утеплению – на уровне 120 руб/м^2. Удельная стоимость замены остекления $\Delta C_{ок}$ в расчете на удвоение сопротивления теплопередаче учитывалась в размере 1200 руб/м^2.

В настоящей работе были проведены расчеты энергопотребления с учетом и без учета энергосберегающих мероприятий по специально разработанной программе для ЭВМ на языке Fortran-6.6 фирмы Compaq с использованием методики оценки энергоэффективности зданий, описанной в [2]. Такая оценка сводится к определению энергетической эксплуатационной характеристики здания. Она равна удельным суммарным затратам $\sum Q_i$ тепловой и электрической энергии, $кВт \cdot ч/(м^2 \cdot год)$, на 1 м^2 отапливаемой площади здания $F_{от}$ за один отопительный период в годовом цикле эксплуатации за вычетом теплопоступлений $Q_{пост}$ от людей, электробытовых приборов и солнечной радиации через световые проемы, если эти поступления можно полезно использовать в здании, т.е. при установке автоматических терморегуляторов:

$$q = \left(\sum Q_i - Q_{пост}\right) \cdot 10^3 / F_{от} \quad (1)$$

В суммарные затраты $\sum Q_i$ входят трансмиссионные теплопотери Q_1 через наружные несветопрозрачные и светопрозрачные ограждающие конструкции, теплозатраты Q_2 на подогрев вентиляционного (для жилых зданий с естественной вентиляцией – инфильтрующегося наружного) воздуха, расход теплоты Q_3 на подогрев воды в системе горячего водоснабжения (ГВС), а также затраты электроэнергии на привод инженерных систем здания (насосы, вентиляторы, лифты и т.д.) Q_4 и на электробытовые приборы Q_5.

Основные составляющие энергозатрат применительно к жилым зданиям вычисляются по формулам (2) и (3) [2]:

$$Q_1 = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot M \cdot \sum \left(n_i \cdot F_i / R_i\right) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Здесь:

β_1 >1 – коэффициент, учитывающий добавочные потери теплоты через ограждения;

β_2 >1 – коэффициент учета округления тепловой мощности отопительных приборов;

$M = 0.024 \cdot \left(t_в - t_{оп}\right) \cdot z_{оп}$ – характеристика отопительного периода, тыс. градусо-часов;

$t_{оп}, z_{оп}$ – средняя температура, °С, и продолжительность, сут, периода со средней суточной температурой воздуха ниже или равной 8°С по [1];

n_i – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху;

F_i и R_i – площадь, м^2, и сопротивление теплопередаче, м^2·К/Вт, ограждающих конструкций оболочки зданий соответственно, в том числе наружных стен, окон, балконных дверей, перекрытия над неотапливаемым подвалом или техническим подпольем, пола по грунту, чердачного перекрытия или покрытия и др. Значения R_i принимаются в зависимости от варианта энергосберегающих мероприятий.

$$Q_2 = 0.33 \cdot M \cdot \left(3 \cdot F_{жил}\right) \cdot k \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Здесь:

$0.33 = \rho \cdot c / 3600 = 1.29 \cdot 1006 / 3600$ – коэффициент (ρ – плотность, c – удельная теплоемкость воздуха);

V – отапливаемый объем здания, м^3;

$F_{жил}$ – суммарная жилая площадь здания, м^2;

параметр 3 представляет собой величину нормативного воздухообмена в м^3/ч на 1 м^2 жилой площади [3];

k – коэффициент учета встречного теплового потока при естественном воздухообмене здания; принимается равным 0.7 для стыков панелей стен и окон с тройными переплетами, 0.8 – для окон и балконных дверей с раздельными переплетами и 1.0 – для одинарных окон, окон и балконных дверей со спаренными переплетами и открытых проемов.

Величина Q_3 определяется в зависимости от расхода горячей воды в системе ГВС с учетом его возможного снижения за счет применяемых энергосберегающих мероприятий, а Q_4 и Q_5 – по установленной мощности соответствующих систем электроснабжения с учетом продолжительности их работы и коэффициентов спроса на электроэнергию.

По результатам данных вычислений были определены значения дисконтированного срока окупаемости $T_{ок}$, лет, рассматриваемого комплекса решений по снижению энергопотребления. Данный комплекс в жилых зданиях массовой застройки включает повышение теплозащиты несветопрозрачных ограждений в экономически целесообразных пределах, применение энергоэффективного остекления, установку автоматических терморегуляторов у отопительных приборов для учета теплопоступлений от солнечной радиации и внутренних источников, а также мероприятия по снижению тепло- и водопотребления в системе ГВС [4], например, установку индивидуальных водосчетчиков, применение кранов с регулируемым напором и левым расположением маховика горячей воды и т.п. [5].

Норма дисконта была принята равной 10% годовых по рекомендациям [6] в соответствии с предполагаемой ставкой рефинансирования ЦБ РФ на ближайшую перспективу.

Площадь остекления характерных зданий-представителей по фасадам представлена на рис. 1 и рис. 2. Здание 1 является вытянутым, многосекционным, иначе называемым «пластина», причем фасады 2 и 4 – торцевые, так что площадь их остекления намного меньше, чем у длинных фасадов 1 и 3. Здание 2 по форме в плане близко к квадратному, так что остекленность фасадов в этом случае отличается менее заметно.

Однако наиболее остекленными в обоих случаях являются фасады 1 и 3.

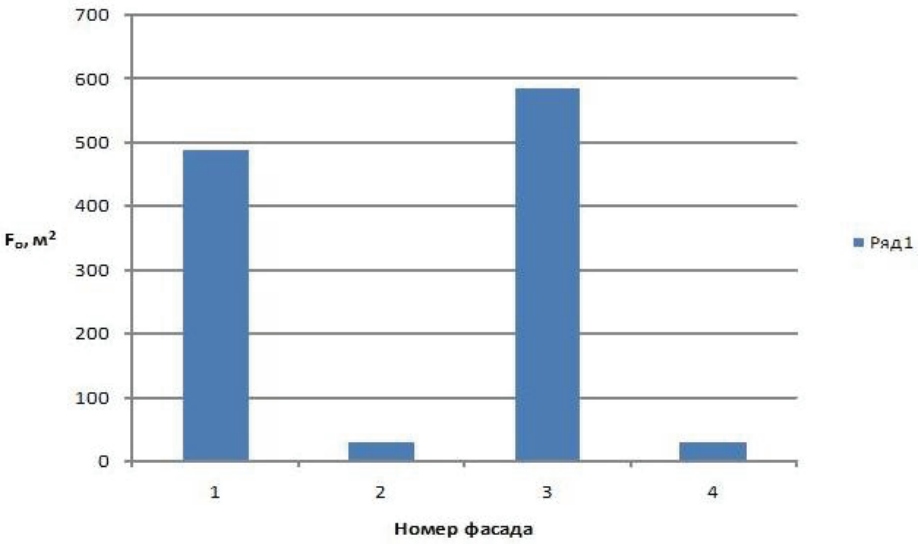


Рисунок 1. Площадь остекления характерного здания-представителя № 1 по фасадам

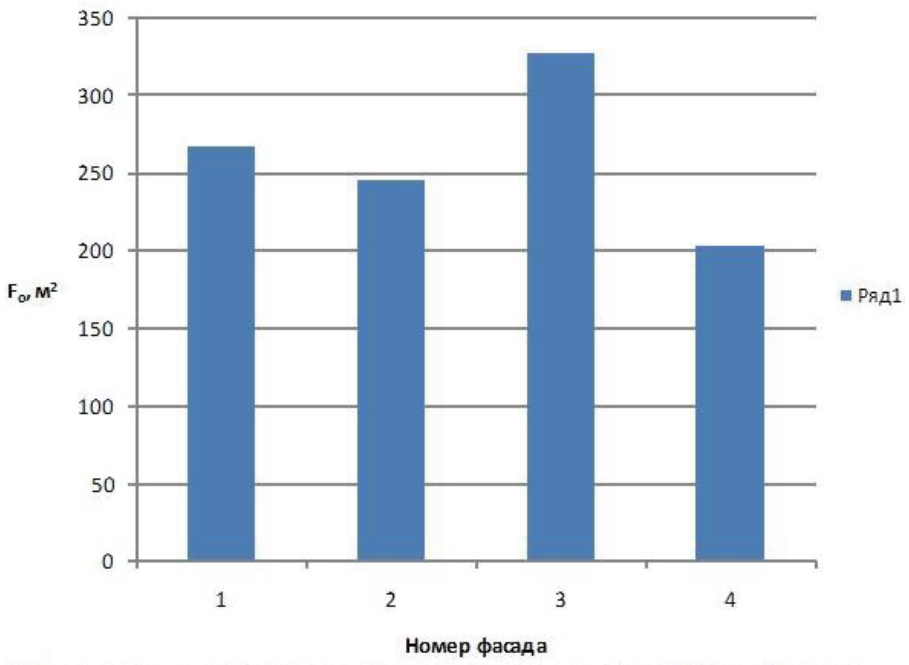


Рисунок 2. Площадь остекления характерного здания-представителя №2 по фасадам

Рассмотрим четыре возможных случая ориентации данных зданий в пространстве. Пусть q_2/q_0 – величина удельного энергопотребления по отношению к базовому варианту без энергосберегающих мероприятий и с теплозащитой по санитарно-гигиеническим требованиям [4]. Тогда в зависимости от ориентации наиболее остекленного фасада по сторонам света для значений градусо-суток отопительного периода D_d [1], соответствующих климатическим условиям городов, для которых проводилось исследование, значения q_2/q_0 могут быть представлены на рис. 3 и рис. 4.

Нетрудно заметить, что относительное энергопотребление увеличивается с ростом D_d и мало зависит от ориентации фасадов в пространстве даже для здания 1 с резко различающейся площадью остекления.

Во всяком случае, разница между вариантами, когда на юг направлена наиболее и наименее остекленная сторона, не превышает 2–4%. Хотя на самом деле имеет смысл любое снижение энергопотребления, даже самое незначительное, если оно экономически оправдано, а в данном случае изменение ориентации объекта не требует вообще никаких дополнительных затрат.

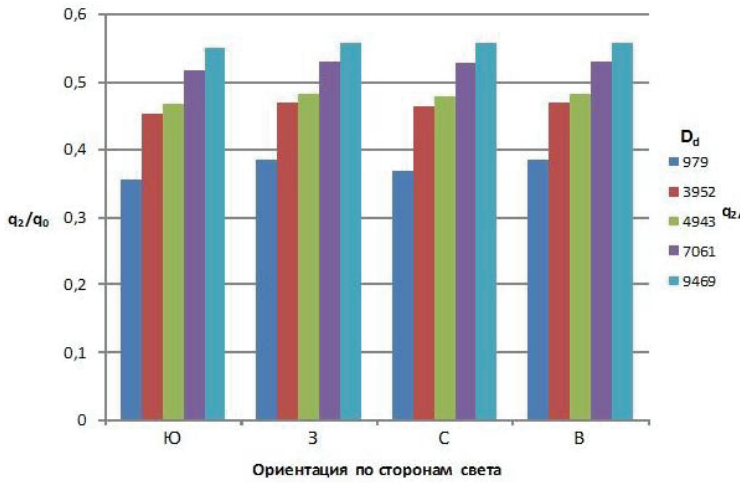


Рисунок 3. Зависимость отношения q_2/q_0 от ориентации наиболее остекленного фасада здания №1 при разных D_d

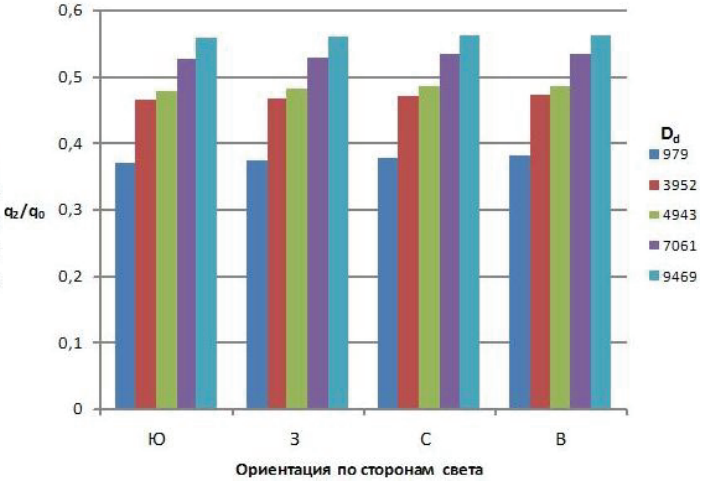


Рисунок 4. Зависимость отношения q_2/q_0 от ориентации наиболее остекленного фасада здания №2 при разных D_d

Зависимость величины $T_{ок}$ от ориентации наиболее остекленного фасада при разных D_d для рассматриваемых объектов приведена на рис. 5 и рис. 6.

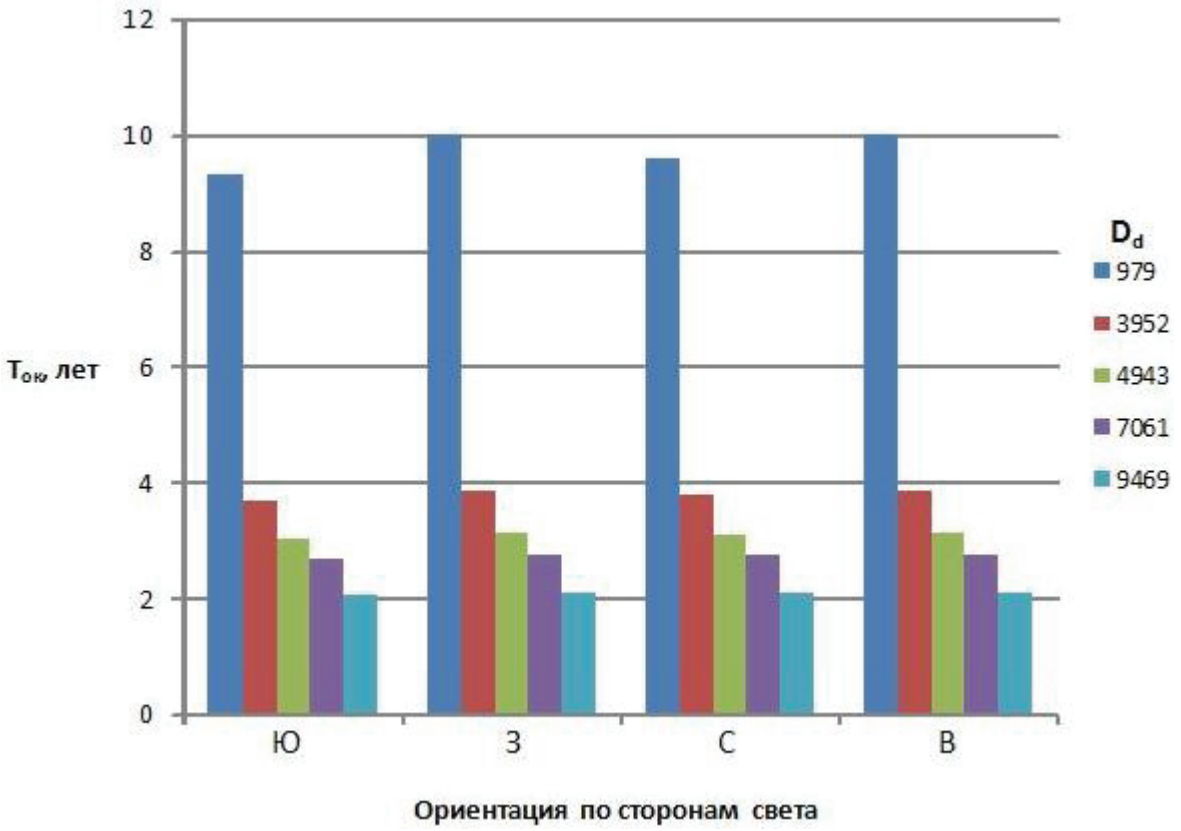


Рисунок 5. Зависимость величины $T_{ок}$ от ориентации наиболее остекленного фасада здания №1 при разных D_d

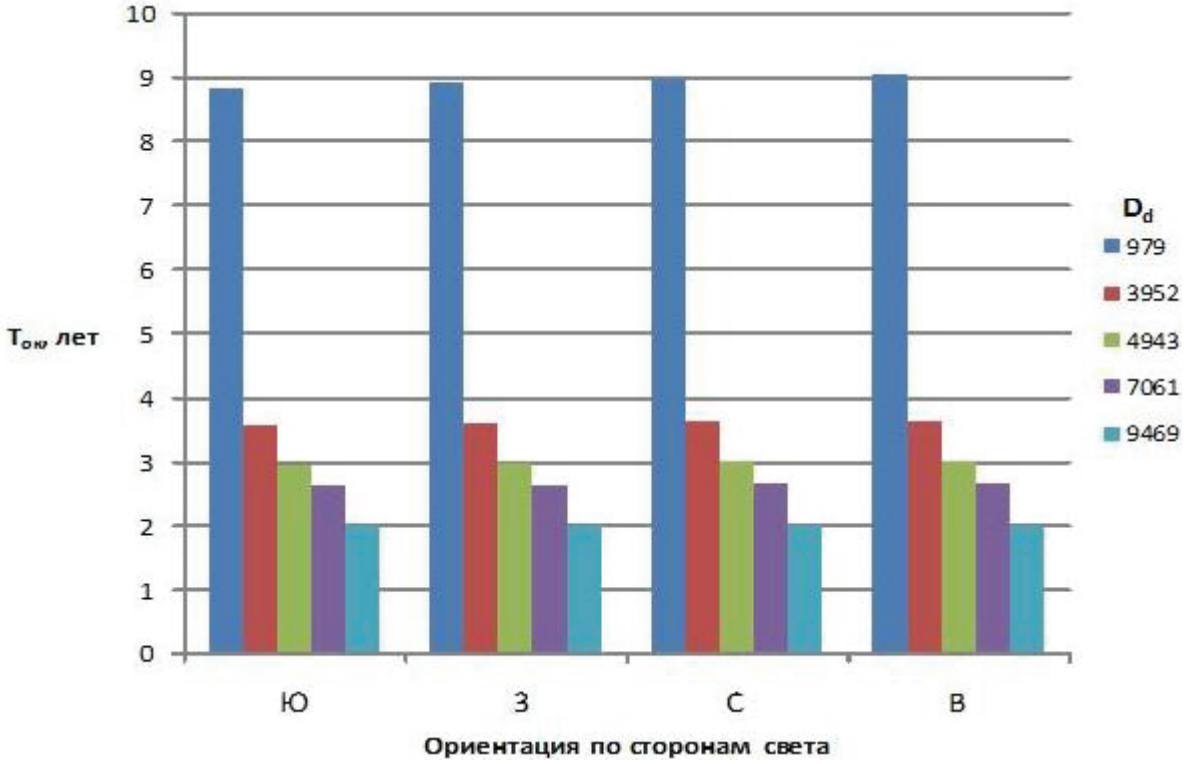


Рисунок 6. Зависимость величины $T_{ок}$ от ориентации наиболее остекленного фасада здания №2 при разных D_d

Очевидно, что в южных районах окупаемость энергосберегающих инженерных решений резко замедляется. Это связано с тем, что в этом случае возрастает относительная разница в теплозащите несветопрозрачных наружных ограждений и, как следствие, увеличивается вклад в общие капитальные затраты наиболее дорогостоящего мероприятия – утепления таких конструкций. В то же время ориентация наиболее остекленного фасада на юг приводит к определенному, хотя и небольшому (примерно на те же 2-4%) снижению $T_{ок}$.

Из полученных данных можно сделать вывод о некотором снижении энергопотребления, если здание ориентировано наиболее остекленным фасадом на юг и в меньшей степени на север, за счет более эффективного использования солнечных теплопритоков. Поэтому длинные здания выгоднее размещать таким образом, чтобы вытянутые фасады были ориентированы на юг и север, а короткие на запад и восток, то есть в широтном направлении, но только с точки зрения теплосбережения в холодный период (ХП) года. В теплый период (ТП) подобная ориентация здания в пространстве, опять-таки из-за более значительных теплопоступлений от солнечной радиации, наоборот, потребует дополнительных энергозатрат на охлаждение помещений. Однако, поскольку здесь речь идет о жилых зданиях массовой застройки, в которых система охлаждения не предусматривается, то мы в своих рекомендациях ориентируемся только на ХП. Все же следует заметить, что в целом дополнительный эффект от рациональной ориентации невелик и, как уже говорилось, в относительном выражении не превышает 2–4%, главным образом из-за небольшой доли солнечной радиации в общих теплопоступлениях в помещения. Особенно это становится заметно при использовании энергоэффективного остекления с пониженным коэффициентом светопропускания.

Таким образом, мы получили оценку снижения энергопотребления за счет использования теплопоступлений от солнечной радиации в зависимости от ориентации здания при неравномерном остеклении. Но приведенные здесь результаты показывают, что влияние данного фактора на общий энергетический баланс незначительно, поэтому потенциал этого энергосберегающего мероприятия достаточно мал.

Следовательно, рассмотренные рекомендации учитывать можно и даже нужно, но основное внимание нужно уделять другим, более эффективным решениям, перечисленным в начале работы, так как они дают более значимый результат и от ориентации здания не зависят.

Литература

1. СНиП 23-01-99* «Строительная климатология». – М. : ГУП ЦПП, 2004.
2. СТО 175 32043-001-2005. Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий. Стандарт общественной организации – РНТО строителей. М.: ГУП ЦПП, 2006.
3. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». – М. : ГУП ЦПП, 2004.
4. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. – М. : Изд-во АСВ, 2009. – 296 с.
5. Васильев Г.П. Результаты натурных исследований теплового режима экспериментального энергоэффективного дома // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – №6. – С. 3–5.
6. Дмитриев А.Н., Табунщиков Ю.А., Ковалев И.Н., Шилкин Н.В. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. – 120 с.

**Олег Дмитриевич Самарин, Москва, Россия*

Тел. раб.: +7(499)188-36-07; эл. почта: samarin1@mtu-net.ru

К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

К.т.н, зав. кафедрой А.Д. Кривошеин*;
к.т.н., доцент С.В. Федоров,
Инженерно-строительный институт
Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии

Обращение к теме расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций обусловлено большим количеством вопросов, возникающих на стадии проектирования зданий при выполнении расчетов в соответствии с требованиями СНиП 23-02-2003 [1] и СП 23-101-2004 [2]. И, прежде всего, при выполнении расчетов с применением программ расчета (моделирования) температурных полей.

Ограждающие конструкции современных зданий характеризуются наличием утепляющих и конструктивных слоев, различного рода теплопроводных включений в виде плит перекрытий, перегородок, связей, конструктивных элементов фасадных систем и т.п.

Универсальный метод оценки теплозащитных качеств таких конструкций основан на применении программ расчета двухмерных (плоских) или трехмерных (пространственных) температурных полей. Для его реализации разработан и применяется ряд компьютерных программ. В СНиП 23-02-2003 [1], СП 23-101-2004 [2] прописаны основные положения методики расчетов и приведены примеры их выполнения.

Однако, к сожалению, по ряду положений в [1, 2] допущены неточности; ряд методических вопросов, существенно влияющих на корректность результатов расчетов, не оговорен. Как следствие – возможность произвольной трактовки отдельных положений, большие расхождения в результатах расчетов даже при использовании одних и тех же программных средств.

Цель статьи – изложение точки зрения авторов по данному вопросу в дополнение к ранее опубликованным работам.

Из истории вопроса

Говоря о методике расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий, представляется целесообразным начать с уточнения физического смысла этого показателя и его увязки с конечной целью теплотехнических расчетов – проектированием систем отопления.

Именно для оценки теплопотерь помещений через ограждающие конструкции при проектировании систем отопления еще в незапамятные времена были предложены простые формулы [3, 4], которые с незначительными изменениями дошли и до нашего времени

$$Q_{огр} = \left(t_{\text{int}} - t_{ext}\right) \cdot k \cdot F \cdot n \cdot \left(1 + \sum \beta\right), \quad (1)$$

или

$$Q_{огр} = \frac{\left(t_{\text{int}} - t_{ext}\right)}{R_0} \cdot F \cdot n \cdot \left(1 + \sum \beta\right), \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи конструкции, Вт/(м^2·°С);

R_0 – сопротивление теплопередаче конструкции, (м^2·°С)/Вт;

F – расчетная площадь конструкции, м^2;

t_{int}, t_{ext} – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °С;

n – коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху;

$\left(1 + \sum \beta\right)$ – добавки к основным потерям тепла, учитывающие ряд особенностей теплопередачи через отдельные конструкции.

Для определения расчетных площадей ограждающих конструкций были выработаны единые правила обмера поверхностей [3, 4]. В частности, расчетная площадь окон должна приниматься по наименьшим размерам «в свету» (соответственно потери тепла через оконные откосы, монтажные швы должны учитываться при расчете приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен), при определении

площади стен их длина должна приниматься от наружной кромки угла до оси промежуточной стены или перегородки, высота стен верхнего этажа – от уровня пола до верха утеплителя чердачного перекрытия и т.п.

Следует отметить, что эти правила действуют и в настоящее время при проектировании систем отопления.

Для однослойных или многослойных конструкций с последовательно расположенными слоями (теплотехнически однородные конструкции) величину сопротивления теплопередаче R_0 принято рассчитывать по формуле:

$$R_0 = 1/\alpha_{\text{int}} + \sum\left(\delta_i / \lambda_i\right) + 1/\alpha_{ext}, \quad (3)$$

где δ_i – толщина *i*-го слоя конструкции, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i-го слоя, Вт/(м·°С);

$\alpha_{\text{int}}, \alpha_{ext}$ – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности конструкции, Вт/(м^2·°С).

Для многослойных конструкций с применением эффективных утеплителей и различного рода связями, как правило, ухудшающими теплозащитные качества этих конструкций (теплотехнически неоднородные конструкции), расчет R_0 по формуле (3) уже неправомерен, поскольку влияние неоднородных включений («мостиков холода») может приводить к весьма существенному увеличению теплопотерь и, соответственно, снижению сопротивления теплопередаче конструкции в целом.

Для характеристики теплозащитных качеств таких неоднородных конструкций и было введено понятие приведенного сопротивления теплопередаче (далее в статье эта величина будет обозначаться R_0^r).

Следует отметить, что теплотехническая неоднородность конструкций может быть обусловлена как наличием теплопроводных включений (неоднородность первого типа), так и их формой (неоднородность второго типа – см. рис. 1). И, строго говоря, расчет R_0 даже однослойных наружных стен должен проводиться как для неоднородных конструкций с учетом потерь тепла через оконные и дверные откосы. Именно такой подход заложен в настоящее время в СНиП 23-02-2003 [1].

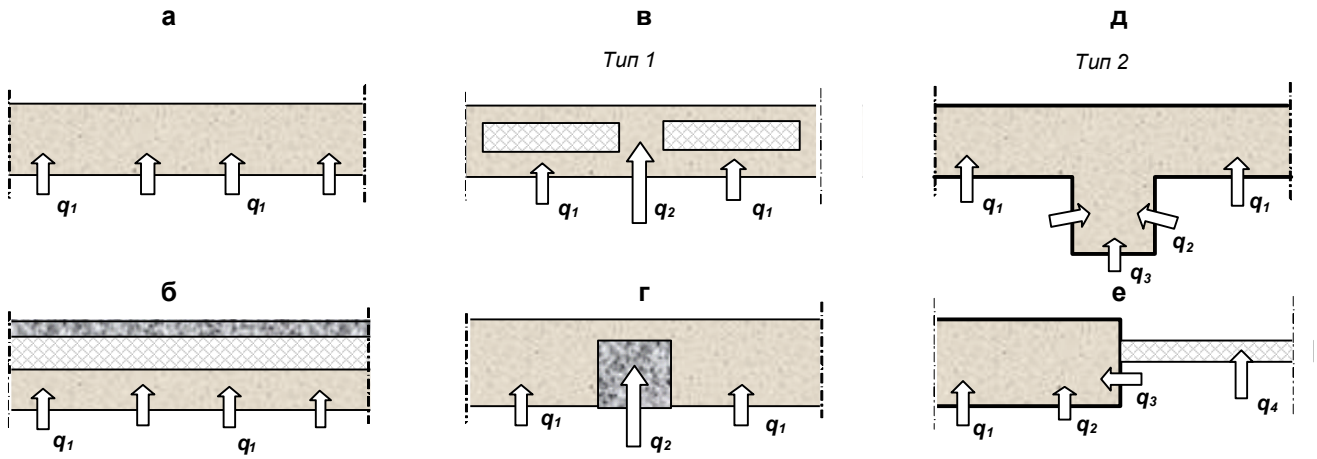


Рисунок 1. Примеры теплотехнически неоднородных ограждающих конструкций

Исходя из формулы (2), физический смысл приведенного сопротивления теплопередаче заключается в «приведении» фактических потерь тепла через теплотехнически неоднородную конструкцию к аналогичной по площади теплотехнически однородной конструкции с равными потерями тепла. При этом, если реальная конструкция отличается от пластины с плоскопараллельными поверхностями, то площадь приведения принимается равной проекции этой конструкции на параллельную поверхность (рис. 2).

Таким образом, реальная теплотехнически неоднородная конструкция «приводится» к условно однородной конструкции, потери тепла через которую равны суммарным потерям тепла исходной неоднородной конструкции. И обусловлено это «приведение» удобством расчета при проектировании систем отопления и расчете теплопотерь по формулам (1) или (2).

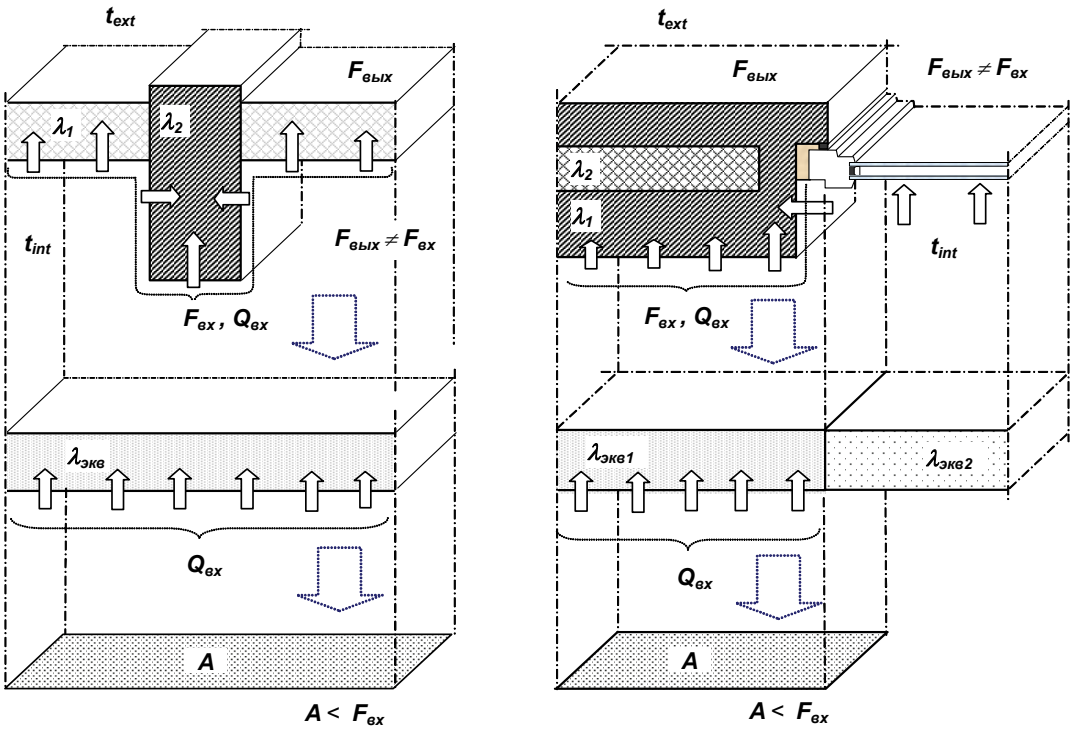


Рисунок 2. Схемы приведения теплотехнически неоднородных конструкций к однородным: а – стена с теплопроводным включением; б – стена с окном

Особенности выбора расчетной области для оценки теплозащитных качеств ограждающих конструкций с применением компьютерных программ

Одним из первых вопросов, возникающих при расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с применением программ расчета температурных полей, является выбор расчетной области. Какой участок фасада здания, покрытия, цокольного перекрытия и т.п. принимать в качестве расчетного? К сожалению, ни в общих положениях [1], ни в примерах расчетов [2] методика решения этой задачи не раскрыта, хотя в соответствии с требованиями СНиП 23-02-2003 *«приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен следует рассчитывать для фасада здания либо для одного промежуточного этажа с учетом откосов проемов без учета их заполнений»*.

Формально задача выбора расчетной области может быть сведена к следующим частным случаям:

- разбиение фасада здания или промежуточного этажа на отдельные фрагменты;
- выбор расчетной области фрагмента здания для расчета температурного поля;
- выбор расчетной области для оценки температурного режима отдельных узлов.

Подобная детализация обусловлена тем, что, несмотря на все расширяющиеся возможности программных средств, введение в расчет фасада здания в целом и, соответственно, получение величины приведенного сопротивления теплопередаче прямым расчетом представляется в большинстве случаев задачей малореальной. И обусловлено это как ограниченными возможностями программного обеспечения, так и необходимостью учета и соответствующей детализации отдельных конструктивных элементов.

Возможные варианты разбиения ограждающих конструкций здания на расчетные фрагменты приведены на рис. 3.

В качестве расчетных областей представляется целесообразным принимать повторяющиеся однотипные участки, например, участки фасада без оконных проемов, с оконными проемами, с балконными дверями и т.п. Для уменьшения объема вычислений эти участки далее могут быть разбиты на расчетные области по осям симметрии.

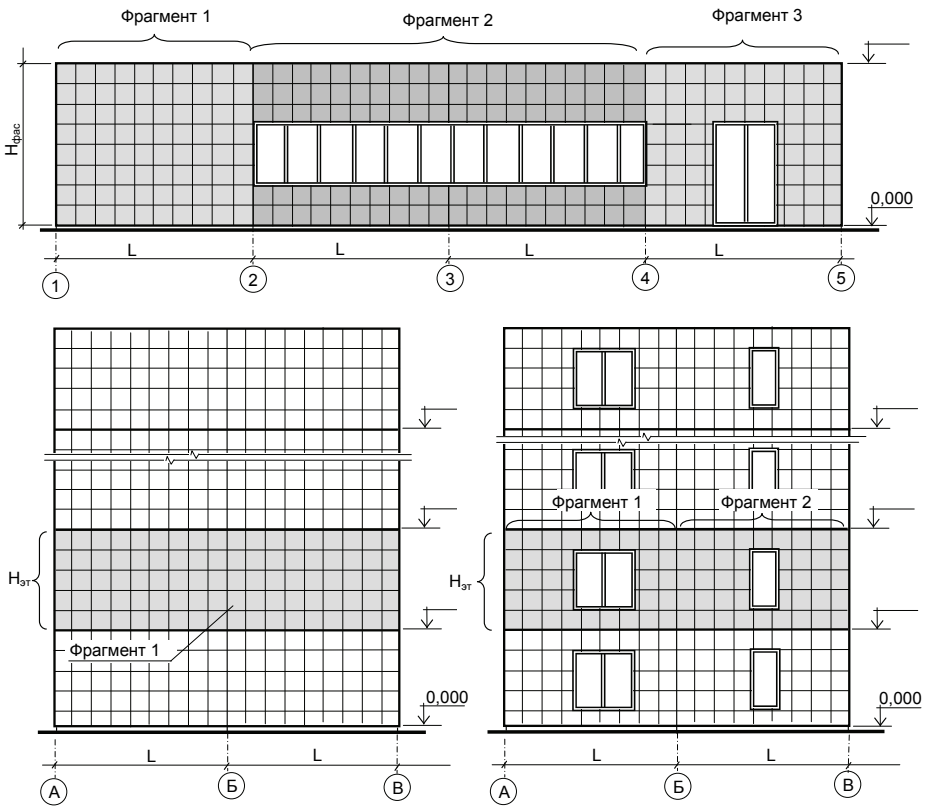


Рисунок 3. Возможные варианты разбиения фасада здания (а) или промежуточного этажа (б) на отдельные фрагменты

Второй вопрос, возникающий в этой связи, – определение размеров и площадей расчетных участков.

Если исходить из правил обмера поверхностей ограждающих конструкций, применяемых при расчете теплопотерь, то размеры следует принимать по внешним поверхностям.

Однако СНиП 23-02-2003 оговаривает, что площадь наружных ограждающих конструкций должна приниматься по внутренним размерам здания. И, соответственно, при проведении расчетов в настоящее время необходимо ориентироваться именно на эти требования, учитывая, что при проектировании системы отопления будут применяться иные правила обмера поверхностей. Соответственно, расчеты R_0^r должны вестись по входящим в конструкцию тепловым потокам. Примеры определения размеров расчетных участков (линейных размеров или площадей) для расчета тепловых потоков, входящих в расчетную область, приведены на рис. 4.

Третья задача – формализация расчетной области. Реальные конструкции, в отличие от примеров, приведенных в [2], как правило, включают оконные и дверные балконные блоки, входные двери, перекрытия, перегородки, выступающие углы и т.п. Соответственно, при подготовке расчетной области возникает вопрос о степени детализации и учете этих конструктивных элементов.

При решении данного вопроса представляется целесообразным руководствоваться следующими соображениями:

- для ограждающих конструкций, содержащих оконные или дверные проемы, расчеты следует проводить с учетом заполнения этих проемов; при этом оконные или дверные блоки могут быть представлены в виде пластин с заданными коэффициентами теплопроводности;
- участки конструкций с плитами перекрытий, внутренними стенами, перегородками и т.п. следует рассчитывать с учетом этих элементов, принимая в общем случае их длину не менее 5 толщин [5];
- для наружных стен, содержащих выступающие углы, длина стен должна приниматься по осям симметрии или не менее 5 толщин стены в каждую сторону от внутренней поверхности угла; при необходимости уменьшения размеров рассчитываемой области следует проводить проверку результатов расчета температурного поля путем сопоставления с расчетом по одномерному температурному полю [5];

- при необходимости оценки теплозащитных качеств светопрозрачных конструкций (оконных блоков или профильных систем), расчет R_0^r должен проводиться без учета наружных стен или покрытий, в которые эти конструкции встроены; в данном случае расчет должен проводиться с учетом реальной конфигурации и размеров рассчитываемых конструкций;
- криволинейные поверхности, например, наружные стены круглого в плане помещения, могут приводиться к условно прямолинейным очертаниям с равной площадью внутренней поверхности.

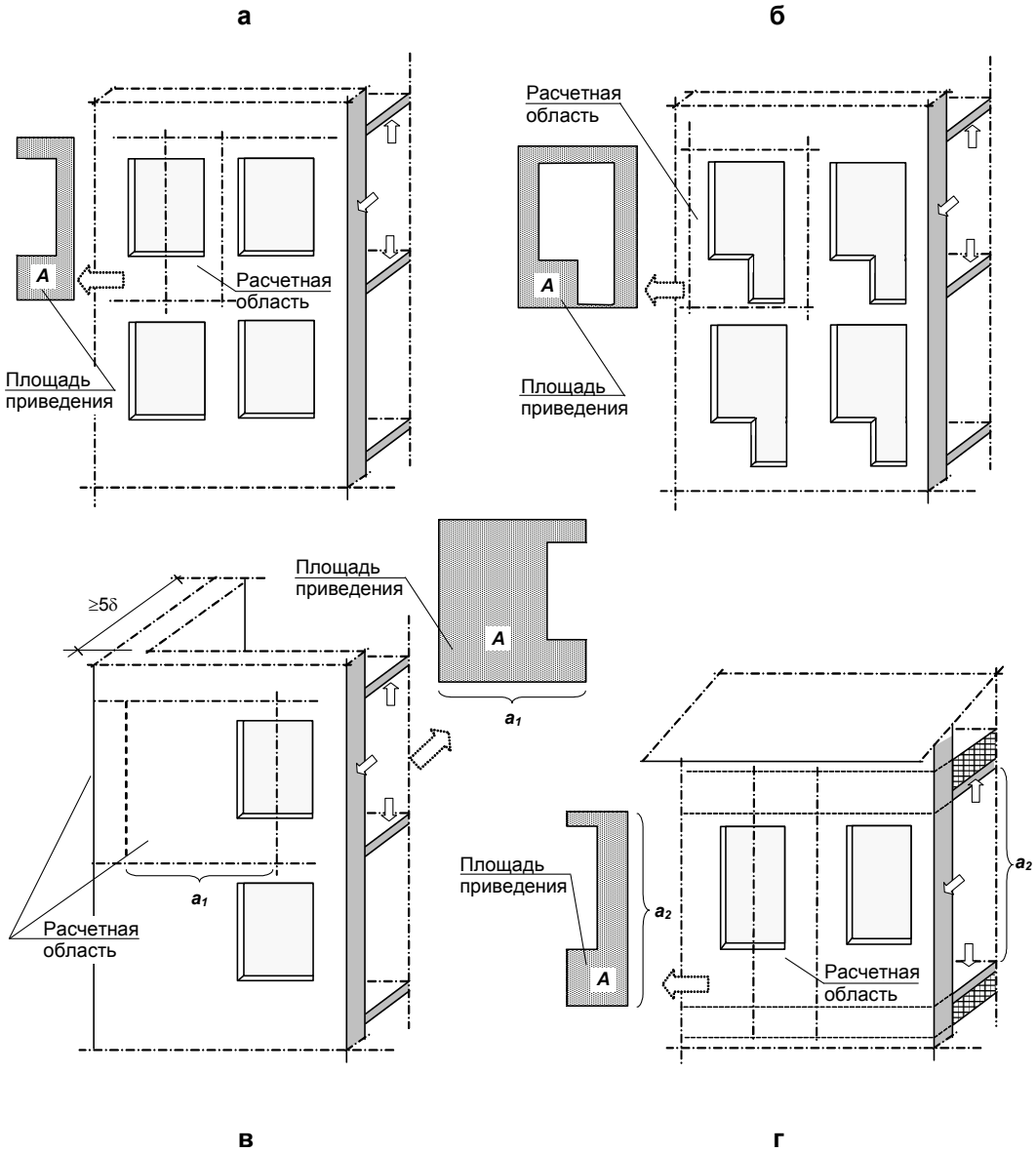


Рисунок 4. Примеры задания расчетной области для некоторых конструкций: а – стена с окнами; б – стена с балконными дверями; в – стена углового помещения; г – стена одноэтажного здания

Требования к программному обеспечению и степени детализации разбиения расчетной области

Говоря о требованиях к программному обеспечению, следует понимать, что выполняемые расчеты являются приближенными. В основе большинства расчетных программ лежит метод конечных элементов или метод конечных разностей. Соответственно, точность результатов расчетов в значительной мере зависит от степени разбиения расчетной области на элементарные участки или объемы, от допустимой погрешности итерационных вычислений.

Не вдаваясь в тонкости численных методов, представляется необходимым введение единых требований к программным продуктам, применяемым для решения подобного рода задач. В частности, введение требований по контролю качества разбиения расчетной области, допустимой погрешности расчета тестовых примеров, возможности задания переменных граничных условий по различным поверхностям

рассчитываемой области, выводу информации в виде входящих и выходящих тепловых потоков, средних температур по различным поверхностям конструкции и др.

Лишь в этом случае можно говорить о соблюдении единства подходов и сопоставимости результатов расчетов.

В качестве примера можно привести ряд известных европейских нормативных документов – EN ISO 10211-2 [6], EN ISO 10077-2 [7], в которых поставленные вопросы в той или иной мере уже оговорены.

Обработка результатов расчета и определение приведенного сопротивления теплопередаче по результатам расчетов

Для расчета величины приведенного сопротивления теплопередаче неоднородных конструкций R_0^r по результатам расчета температурных полей в [2] предлагается формула:

$$R_0^r = \frac{\left(t_{\text{int}} - t_{ext}\right)\cdot n}{\sum Q_{вх}} \cdot A \text{ , (4)}$$

где $\sum Q_{вх}$ – суммарный тепловой поток, входящий в конструкцию или ее фрагмент, Вт, определяемый на основе расчета температурного поля;
A – площадь приведения рассчитываемой ограждающей конструкции, м^2.

Необходимо отметить, что в СП 23-101-2004 допущена неточность: величина A обозначена как *«площадь неоднородной ограждающей конструкции или ее фрагмента, м^2, по размерам с внутренней стороны, включая откосы оконных проемов»* [2].

Исходя из физического смысла приведенного сопротивления теплопередаче (см. выше) суммарный тепловой поток $\sum Q_{вх}$ должен определяться с учетом потерь тепла через оконные откосы, перегородки, плиты перекрытия и т.п. (то есть суммироваться), но фигурировать в формуле (4) должна именно площадь приведения, согласно которой в дальнейшем и будут вычисляться теплопотери по формуле (2).

Отдельный вопрос в этой связи – расчет конструкций с углами. Подобного рода вопросы возникают при расчете угловых помещений, лоджий и т.п. В данном случае представляется правильным расчет проводить для всей конструкции (с углами), но при определении величины $\sum Q_{вх}$ учитывать входящие тепловые потоки по рассчитываемой стене до внутренней поверхности угла (см. рис. 4). При этом в качестве площади приведения A принимать проекцию этой стены на параллельную поверхность – до внутренней поверхности угла. Как показывают сопоставительные расчеты, данный подход обеспечивает наиболее корректные результаты с расчетами теплопотерь помещений по формуле (2).

Аналогично, при расчете конструкций с оконными или дверными проемами площадь приведения должна приниматься по размерам «в свету».

При известных значениях $R_{0,i}^r$ отдельных участков величина среднего приведенного сопротивления теплопередаче фасада здания или типового этажа может быть рассчитана по формуле [2]:

$$R_0^r = A_0 / \left(\sum A_i / R_{0,i}^r\right), \text{ (5)}$$

где A_0 – общая площадь конструкции, равная сумме площадей отдельных участков, м^2;
$A_i, R_{0,i}^r$ – площадь, м^2, и приведенное сопротивление теплопередаче, м^2·°С/Вт, *i*-го участка.

Особенности расчета температурного режима отдельных узлов

Оценка температурного режима отдельных узлов ограждающих конструкций, как правило, является самостоятельной задачей, причем зачастую даже более важной, чем расчет R_0^r.

Если погрешности расчета R_0^r в определенной мере нивелируются при проектировании системы отопления, то нарушение температурного режима вследствие ошибок конструирования может проявляться в выпадении конденсата, образовании плесени, повреждении отделки помещений (что зачастую и имеет место, особенно при повышенной влажности воздуха).

Расчет таких узлов требует, как правило, постановки и решения задачи моделирования трехмерного (пространственного) температурного поля [8].

В качестве примера на рис. 5 приведены результаты расчета наружного выступающего угла в зоне его сопряжения с плитой чердачного перекрытия. Как видно из представленного распределения температур, влияние особенностей теплопередачи в наружном углу может быть весьма существенным и требует соответствующего учета при проектировании.

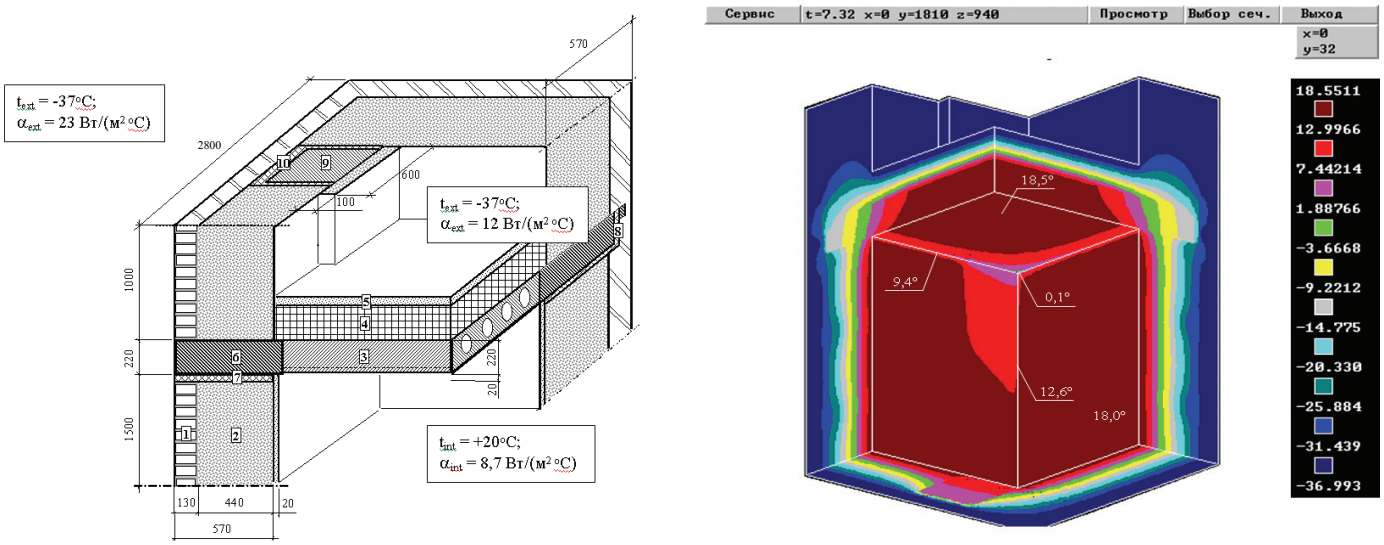


Рисунок 5. Пример расчета трехмерного температурного поля узла сопряжения наружных стен с чердачным перекрытием

Литература

1. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
2. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
3. Аше Б.М. Отопление и вентиляция. Том 1: Общие сведения. – М.-Л. : Госстройиздат, 1939. – 516 с.
4. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 1. Отопление, водопровод, канализация : Справочник проектировщика / Под ред. И.Г. Староверова. – 4-е изд. – М. : Стройиздат, 1990. – 430 с.
5. Табунщиков Ю.А., Хромец Д.Ю., Матросов Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений. – М. : Стройиздат, 1986. – 382 с.
6. EN ISO 10211-2. Berechnung der Wärme-ströme und Oberflächentemperaturen. Teil 2: Linienformige Wärmebrücken.
7. EN ISO 10077-2. Berechnung des Wärme-durchgangskoeffizienten. Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen.
8. Кривошеин А.Д., Федоров С.В. Руководство пользователя программным комплексом «TEMPER» по расчету температурных полей ограждающих конструкций зданий / СибАДИ. – Омск, 1997. – 36 с.

** Александр Дмитриевич Кривошеин, г. Омск, Россия*

Тел. раб.: +7(3812)24-36-91; эл. почта: gshomsk@mail.ru

Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен зданий на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения

Д.т.н., профессор В.В. Бабков;
к.т.н., доцент Д.В. Кузнецов;
к.т.н., доцент А.М. Гайсин;
аспирант О.А. Резвов*;
аспирант Н.С. Самофеев,
ГОУ Уфимский государственный нефтяной технический университет;
к.т.н., технический директор Е.В. Морозова,
ООО «Баумит»

В практике производства и применения автоклавных газобетонных изделий на основе известково-кремнеземистых или смешанных вяжущих в наружных стенах, ставших в последние годы особенно актуальными в связи с повышением требований к теплозащите ограждающих конструкций зданий, важной и требующей разрешения является проблема защиты и обеспечения долговечности таких стен. Опыт эксплуатации зданий с подобными стенами относительно короткий и не превышает 50 лет.

Автоклавный газобетон в составе наружной стены эксплуатируется в широком диапазоне влажности, в условиях попеременного увлажнения и высушивания. При действии этого фактора в материале возникают неравномерные в объеме деформации набухания-усадки, обусловленные реализацией механизма сорбции-десорбции, а также напряжения стягивания менисков в капиллярах, что приводит к развитию внутренних напряжений и локальным структурным повреждениям, деструкции материала [1]. Влагостойкость материала в данном случае связана с амплитудой цикла и числом циклов попеременного увлажнения и высушивания.

Структура автоклавного бетона со средней плотностью 400-600 кг/м^3 имеет большой объем «резервной» пористости, что при увлажнении на уровне сорбционного в условиях действия попеременного замораживания-оттаивания не приводит к развитию внутриструктурных напряжений. Однако, при влагонакоплении выше сорбционного в порах структуры формируются водные мениски, происходит частичное или полное заполнение пор водой, что при фазовых превращениях жидкой поровой влаги в лед с 9%-ным увеличением объема обуславливает развитие внутриструктурного давления льда и гидравлическое давление ещё не замёрзшей воды, захваченной льдом и твёрдой фазой стенок пор [2]. Этот механизм реализуется в виде многократных повторных воздействий и также приводит к снижению прочности. В соответствии с распределением температуры по толщине стены размораживание сочетается с интенсивным замачиванием наружной стены при косом дождевании, при конденсации влаги в переходные периоды «зима-весна», «осень-зима» и локализуется в наружных слоях стены.

Оптимизация технологии производства автоклавных стеновых изделий основывается, как правило, практически на единственном критерии – максимальной прочности применительно к конкретной плотности. В соответствии с этим, проектирование составов известково-кремнеземистых или смешанных вяжущих, применительно к кремнезему определенной дисперсности (3000 – 5000 см^2/г), базируется на минимальном соотношении C/S, с формированием в цикле автоклавирования низкоосновных гидросиликатов кальция типа ксонотлита (C_6S_6H), тоберморита ($C_5S_6H_6$) при полном связывании извести. Такая система, в силу высокой пористости 75 – 85% и переменного увлажнения, уязвима по воздухостойкости из-за доступности стуктурообразующих фаз в виде гидросиликатов кальция для углекислого газа воздуха CO_2. Карбонация ячеистого бетона атмосферной углекислотой протекает во много раз быстрее, чем в плотных силикатных бетонах или на цементной основе. Скорость карбонизации не останавливается в поверхностных слоях стены, как это происходит у тяжелых бетонов. Глубокому проникновению CO_2 в толщу стены и сравнительно высокой скорости протекания карбонизационных процессов способствует сеть сквозных капилляров и макропор, характерных для ячеистых бетонов, пористость которых формируется за счет газообразователя.

Карбонизация низкоосновных гидросиликатов кальция, преобладающих в автоклавном газобетоне, происходит с перекристаллизацией в карбонаты кальция при выделении кремнекислоты с потерей объема носителя прочности – кристаллической фазы. Более благоприятным для сохранения прочности и обеспечения долговечности будет растянутый во времени двухстадийный процесс перекристаллизации высокоосновных гидросиликатов кальция частично в низкоосновные гидросиликаты и частично – в кальцит (первая стадия). Имеющаяся при этом непрогидратировавшая известь также будет перекристаллизовываться в $CaCO_3$, при этом, объем носителя прочности – кристаллической фазы будет прирастать. На второй стадии перекристаллизации низкоосновных гидросиликатов в карбонаты также будет наблюдаться увеличение

объема кристаллической фазы. Эти выводы подтверждаются результатами расчетов авторов, представленными в табл. 1.

Результаты исследований, проведенных Е.С. Силаенковым по принудительной карбонизации автоклавного газобетона, показали снижение прочности ячеистых бетонов на известково-кремнеземистых вяжущих, сформированных из низкоосновных гидросиликатов, относительно показателей до карбонизации [3]. Механизм снижения прочности газобетона при действии атмосферной углекислоты связан с повреждением структурообразующего элемента – межпоровых перегородок.

Таблица 1. Результаты расчета объемных изменений при карбонизации гидросиликатных фаз

Реакции карбонизации	Исходные кристаллические фазы до карбонизации		Кристаллические продукты карбонизации		Коэффициент изменения объема кристаллической фазы
	Молекулярная масса m_x	Плотность γ_x, г/см^3	Молекулярная масса m_y	Плотность γ_y, г/см^3	
1	2	3	4	5	6
1 $Ca(OH)_2 + CO_2 \Rightarrow CaCO_3 + H_2O$	74,09	2,23	100,09	2,71	1,111
2.1(гиллебрандит) => (ксонотлит) $6C_2SH_{1.17} + 6CO_2 \Rightarrow \Rightarrow C_6S_6H + 6CaCO_3 + 6H_2O$	1159,8	2,64	714,96 600,54	2,69 2,71	1,11
2.2 (ксонотлит) $C_6S_6H + 6CaCO_3 + 6H_2O + 6CO_2 \Rightarrow \Rightarrow 12CaCO_3 + 6SiO_2 + 7H_2O$	–	–	120,1	2,71	1,01
3.1 (фошагит) => (ксонотлит) $2C_5S_3H_{.3} + 4CO_2 \Rightarrow$ $\Rightarrow C_6S_6H + 4CaCO_3 + 5H_2O$	1029,28	2,67	714,96 400,36	2,69 2,71	1,073
3.2 (ксонотлит) $C_6S_6H + 4CaCO_3 + 5H_2O + 6CO_2 \Rightarrow 10CaCO_3 + 6SiO_2 + 6H_2O$	–	–	1000,1	2,71	0,957
4.1 (афвиллит) => (ксонотлит) $3C_3S_2H_{.3} + 3CO_2 \Rightarrow$ $\Rightarrow C_6S_6H + 3CaCO_3 + 8H_2O$	1027,14	2,64	714,96 300,27	2,69 2,71	0,994
4.2 (ксонотлит) $C_6S_6H + 3CaCO_3 + 8H_2O + 6CO_2 \Rightarrow \Rightarrow 9CaCO_3 + 6SiO_2 + 9H_2O$	–	–	600,54	2,71	0,877
5 (ксонотлит) $C_6S_6H + 6CO_2 \Rightarrow$ $\Rightarrow 6CaCO_3 + 6SiO_2 + H_2O$	714,96	2,69	600,54	2,71	0,834
6 (риверсайдит) $C_5S_6H_3 + 5CO_2 \Rightarrow$ $\Rightarrow 5CaCO_3 + 6SiO_2 + 3H_2O$	694,98	2,6	500,45	2,71	0,691
7 (тоберморит) $C_6S_5H_{5,5} + 5CO_2 \Rightarrow \Rightarrow 5CaCO_3 + 6SiO_2 + 5,5H_2O$	739,8	2,43	500,45	2,71	0,606
8 (гиролит) $C_2S_3H_{2,5} + 2CO_2 \Rightarrow$ $\Rightarrow 2CaCO_3 + 3SiO_2 + 2,5H_2O$	328,4	2,4	200,18	2,71	0,54

Примечание: C – CaO; S – SiO; H – H_2O

Отметим также, что снижению прочности ячеистобетонной стены будет способствовать не только влажностная и карбонизационная усадка, но и градиент влажности и карбонизации материала по толщине стены, обуславливающий развитие дополнительных конструкционных напряжений растяжения.

Таким образом, необходимым условием воздухостойкости автоклавного газобетона в исходном состоянии является наличие в его структуре гидросиликатов повышенной основности и свободной извести.

Защиту наружной стены на основе автоклавных газобетонных блоков от действия названных выше негативных факторов может решить гидрозащитная штукатурная система, совмещающая также декоративную функцию, т.е. декоративно-защитная система.

Такая система должна обладать гидрофобностью, обеспечивающей блокировку поступления влаги при косом дождевании, конденсатной влаги, локализующейся на поверхности стены в переходные периоды. Адгезия системы к автоклавному газобетону должна быть на уровне прочности основы газобетона на растяжение, т.е примерно $1{,}3R_{btn}$ (R_{btn} – нормативное сопротивление ячеистого бетона на растяжение). Для бетонов средней плотности 400–600 кг/м^3 это соответствует диапазону характеристик адгезии 0,15–0,4 МПа. Элементы защитной системы должны обладать минимальной усадкой, повышенной растяжимостью и морозостойкостью. Материалы защитной системы должны быть паропроницаемыми, чтобы обеспечить защиту стены от переувлажнения по двум критериям: из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период и из условия ограничения влаги за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха ΔW_{au}. Эти условия должны согласовываться с высоким коэффициентом паропроницаемости высокопористого газобетона (μ = 0,23 – 0,17 мг/(м·ч·Па) для ячеистых бетонов со средней плотностью 400-600 кг/м^3) и низким сопротивлением паропроницанию стены (для толщины стены 400мм R_{up} = 1,74 – 2,35м^2·ч·Па/мг).

В условиях Республики Башкортостан опробована декоративно-защитная система «Баумит», характеристики которой получены В.Г. Гагариным с сотр. и предоставлены в табл. 2 [4]. Данные расчёта влагонакопления стены на основе автоклавных газобетонных блоков толщиной 400мм приведены в табл. 3. Расчеты показывают, что по критериям влагонакопления стены в рабочем диапазоне средних плотностей удовлетворяют требованиям СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» (ΔW_{au} < 6%).

На рис. 1 представлены многоэтажные каркасно-монолитные жилые дома в г. Уфе постройки 2006 г. со стенами-заполнениями толщиной 400мм из автоклавных газобетонных блоков со средней плотностью 500 кг/м^3 с фасадной декоративно-защитной системой «Баумит». После четырёх лет эксплуатации защитная система не показала каких-либо повреждений, а стена доказала свою полноценность по теплозащите, температурно-влажностному режиму помещений и по состоянию внутренней поверхности стен.

Таблица 2. Характеристики паропроницаемости и сопротивления паропроницанию элементов декоративно-наружной системы «Баумит»

№№ п/п	Элемент защитной системы	Толщина, мм	Коэффициент паропроницаемости μ, мг/(м·ч·Па)	Сопротивление паропроницанию R_{up}, м^2·ч·Па/мг
1а	Базовый слой в виде клеевого состава Haftmörtel по синтетической сетке, включая грунтовку из того же материала	5	0,050	0,083
1б	То же, KlebeSpachtel	5	0.030	0.166
2	Минеральная декоративная штукатурка EdelPutzSpezial Natur	2	0,085	0,024
Сопротивление паропроницанию декоративно-защитной системы по варианту 1а+2 – 0,107 м^2·ч·Па/мг; по варианту 1б+2 – 0,190 м^2·ч·Па/мг.				

Таблица 3. Данные расчета влагонакопления за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха (ноябрь-март) для наружных стен на основе автоклавных газобетонных блоков в сочетании с декоративно-защитной системой «Баумит» (для условий г. Уфы)

Компоновка стены	Определяемый параметр	Характеристики наружных стен толщиной 400мм из автоклавных газобетонных блоков различной средней плотности, кг/м^3		
		400	500	600
Внутренняя цементно-песчаная штукатурка (20 мм) + стена толщиной 400 мм + фасадная декоративно-защитная система «Баумит» (KlebeSpachtel + EdelPutzSpezial Natur)	Общая толщина стены, м	0,43	0,43	0,43
	R_o^r, (м^2 ^{0}C)/Вт	3,531	3,055	2,698
	R_{up}, (м^2 ч Па)/мг	2,123	2,384	2,737
	ΔW_{au}, сумма за период, %	2,04	1,09	0,45

Рисунок 1. Многоэтажные жилые дома в м-не Сипайлово г. Уфы с наружными стенами из автоклавных газобетонных блоков и фасадной отделкой в виде декоративно-защитного покрытия из материалов системы «Баумит»

Литература

1. Чернышов Е.М., Потамошнева Н.Д. Материаловедение и технология автоклавных бетонов на основе хвостов обогащения железистых кварцитов / Воронежский госуд. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2004. – 160с.
2. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. – М. : НИИСФ РААСН, 2003. – 332 с.
3. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. – М. : Стройиздат, 1986. – 176 с.
4. Гагарин В.Г., Курилюк И.С. Заключение по теме «Выполнить экспериментальные исследования паропроницаемости и сопротивления паропроницанию клеевых и штукатурных составов «BAUMIT» / НИИСФ РААСН. – М., 2010. – 12с.

** Олег Александрович Резвов, г. Уфа, Россия*

Тел. раб. : +7(347)232-68-68; эл. почта: ufaoleg@bk.ru

Огнестойкость междуэтажного перекрытия на основе стальных С-образных профилей

Инженер Д.Е. Коломийцев;
инженер А.О. Родичева,
ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
руководитель группы конструкторов В.А. Рыбаков*,
ОАО «ЛенжилНИИпроект»

Данная статья посвящена обсуждению результатов испытаний образцов междуэтажного перекрытия [1], выполненного на основе стального каркаса из тонколистовых холодногнутых профилей, с обшивкой цементно-магниевыми листами и заполнением внутренней части теплоизоляционными плитами из минеральной ваты.

Испытания проводились в Испытательном центре Федерального государственного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны» (ФГУ ВНИИПО) в 2008 г. Результаты испытаний любезно предоставлены авторам ЗАО «Град Петра», фирмой-изготовителем тонколистовых холодногнутых профилей, являвшихся основными несущими конструкциями испытанных профилей, и заказчиком проведенных испытаний.

С каждым годом легкие стальные тонкостенные конструкции (далее ЛСТК) все больше и больше входят на рынок России, тем более, что наша страна имеет огромную историю металлостроительства, большой опыт проектирования и строительства из металла. Пока еще для России строительство с применением легких стальных тонкостенных конструкций – это относительно новая область, по крайней мере, с точки зрения массового использования. [5]

Но тем не менее, за последние 8–10 лет в нашей стране сформировалась новая отрасль строительной индустрии – производство гнутых профилей из оцинкованной стали.

Учитывая актуальность развития этого направления, в России создана Национальная ассоциация производителей стальных гнутых профилей (NAMSCS), объединяющая более 30 фирм, изготовляющих в год около 1 млн. т гнутых профилей из оцинкованной стали. Область массового применения этих профилей включает легкие несущие и ограждающие конструкции зданий и сооружений различного назначения во всех регионах России. [5]

В гражданском строительстве наиболее эффективно применение конструкций из оцинкованных гнутых профилей в сейсмических районах, малоэтажных коттеджах комплектной поставки и при реконструкции зданий: надстройке мансардных этажей, создании вентилируемых фасадов и замене плоских рулонных кровель на малоуклонные металлические с герметичными стыками. [5]

Однако следует отметить, что при строительстве зданий и проектировании ЛСТК особое внимание следует уделить удовлетворению противопожарных норм и, в частности, проектированию стальных противопожарных конструкций.

Такими перекрытиями служат огнестойкие перегородки, стены, двери, противопожарные перекрытия. Такие перекрытия являются горизонтальными противопожарными преградами, то есть представляют собой противопожарный пол, выполненный из негорючих материалов. Противопожарные перекрытия предусматривают три типа: 1, с пределом огнестойкости R150 (не менее 2,5 часов); 2, предел огнестойкости которого не менее R60 (1 часа) и 3 – не менее R45 (0,75 часа). Второй и третий типы применяются при изоляции чердаков, подвалов и цокольных этажей

Некоторые виды противопожарных перекрытий

Строительные конструкции по пожарной опасности подразделяются на следующие классы: непожароопасные (К0); малопожароопасные (К1); умереннопожароопасные (К2); пожароопасные (К3).

Противопожарные перекрытия предусматривают трех типов и выполняют, как правило, из конструкций класса пожарной опасности К0. Они предназначены для ограничения распространения пожара по этажам здания в течение времени, равного нормируемому пределу огнестойкости. Противопожарные перекрытия без зазоров примыкают к наружным стенам классов пожарной опасности К0. В зданиях с наружными стенами из конструкций класса пожарной опасности К1–К3 или с остеклением, расположенным в уровне перекрытия, перекрытия пересекают эти стены и остекление.

Противопожарные перекрытия, как правило, предусматривают без проемов. При необходимости устройства проемов их защищают противопожарными люками и клапанами соответствующего типа.

Область применения противопожарных перекрытий регламентируется соответствующими нормативно-техническими документами. Наибольшее распространение получили противопожарные перекрытия 2-го и 3-го типов для изоляции подвальных, цокольных и чердачных помещений. Противопожарные междуэтажные перекрытия предусматривают также в качестве горизонтальных ограждающих конструкций помещений, перегородки или стены которых выполняют с пределом огнестойкости не менее EI 45.

С противопожарной стороны перекрытия сдерживают вероятность распространения пожара в вертикальном направлении, т. е. по высоте здания. Наиболее опасно распространение пожара снизу вверх, вследствие этого огнестойкость перекрытий характеризуют при одностороннем воздействии огня, как правило, со стороны их нижней поверхности. При этих условиях все подвесные составляющие потолка в перекрытиях выполняют огнезащитную функцию. Огнестойкость сплошных железобетонных перекрытий зависит от минимальной толщины бетонной плиты и минимальной толщины защитного слоя бетона до главной продольной арматуры.

Огнестойкость пустотных перекрытий из сборного железобетона и полых глиняных блоков зависит от суммарной толщины сплошного материала. При оценке огнестойкости учитывают любой вариант перекрытия, но без учета штукатурки либо какой-то иной облицовки потолка. Однако это не означает, что штукатурка или облицовка не могут содействовать повышению огнестойкости всех типов бетонных перекрытий.

Железобетонные перекрытия, изготовленные из бетона с легкими заполнителями (например, термозит либо спекшаяся зольная пыль), более устойчивы против растрескивания в условиях пожара, чем перекрытия из бетона с заполнителями, повторяющими вид мелкозернистого песчаника либо гравия. Вследствие этого предел огнестойкости перекрытий из бетона с нетяжелым заполнителем выше предела огнестойкости перекрытий из обычного тяжелого бетона. Плиты перекрытий из ячеистого бетона гарантируют хорошую теплоизоляцию, хотя при нагревании в значительной степени прогибаются, что говорит о потребности увеличения их жесткости с помощью увеличения толщины и вспомогательного армирования.

Перекрытия (полы) на основе ЛСТК изготавливают из легких стальных С- или Z-образных профилей. Для обрамления блоков перекрытий по периметру стен применяют U- и С-образные профили соответствующей высоты. По верхнему поясу стальных профилей закрепляются профилированные стальные листы. Опалубка из профлиста распределяет вертикальные нагрузки, а также создает жесткий диск перекрытия, обеспечивающий устойчивость всего здания. Верхняя отделка состоит из листов ГВЛ или тонкого слоя ангидрита (безводного гипса).

Распространенный вариант перекрытия имеет следующее конструктивное решение: С-образные балки; опалубки из профлиста; два слоя ГВЛ для пола сверху; подвесной потолок из листа ГКЛ и огнестойкие плиты ГКЛВ, прикрепленные к нижней опалубке из профлиста, закрепленного к нижнему поясу балки. Полость перекрытия заполняется с уплотнением слоем минераловатных плит. Узлы стыка между полом и внешней стеной должны быть спроектированы так, чтобы не допускать вертикальной передачи звука и проникновения влаги извне в конструкцию перекрытия. Отверстия для инженерных коммуникаций должны быть проделаны в несущих профилях перед сборкой конструкций.

Категория огнестойкости конструкции пола оценивается экспериментально. Полы между квартирами (для зданий от двух этажей) должны соответствовать противопожарным требованиям EI60. Если конструкция пола удовлетворяет требованиям по несущей способности, то она, в общем случае, отвечает требованиям и по разделительной функции. Снизу конструкция пола защищена от огневого воздействия потолком, который может быть либо прикреплен непосредственно к балкам перекрытия, либо подвешен. Если подвесной потолок с огнестойкостью EI60 (по целостности E и теплоизолирующей способности I) защищает несущую стальную конструкцию, то требование противопожарной безопасности по REI60 (еще и по несущей способности R) также выполняется для несущих балок конструкции перекрытия [7]. Противопожарная защита может быть выполнена путем облицовки потолка двумя слоями 15-мм огнеупорного гипсового листа ГВЛО (гипсоволокнистые листы огнеупорные). Пол защищают аналогично с помощью гипсовых листов пола. [5]

Характеристика испытанных образцов фрагмента перекрытия

Испытания опытных образцов междуэтажного перекрытия проводились с целью определения предела огнестойкости представленных образцов по ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции».

На испытания были представлены 2 образца фрагмента междуэтажного перекрытия размером 4000x2000x220 мм. Эскиз конструкции опытного образца представлен на рис. 1.

Опытный образец фрагмента междуэтажного перекрытия представлял собой трехслойную конструкцию, выполненную на основе несущего стального каркаса из тонколистовых холодногнутых оцинкованных профилей С-образного сечения, выпускаемых в соответствии с ТУ 1121-006-23135079-2007, устанавливаемых в количестве 8 штук по длине образца с шагом 500 мм. Размеры сечения профиля – 200*50x15x2,0 мм.

Периметр каркаса (по ширине образцов) выполнялся из профилей швеллерного сечения размерами 200x40x2,0 мм.

Обшивка каркаса фрагмента междуэтажного перекрытия с обеих сторон выполнялась двумя слоями цементно-магниевых плит марки «УНИПРОК-НГ» толщиной 10 мм (2x10-20 мм).

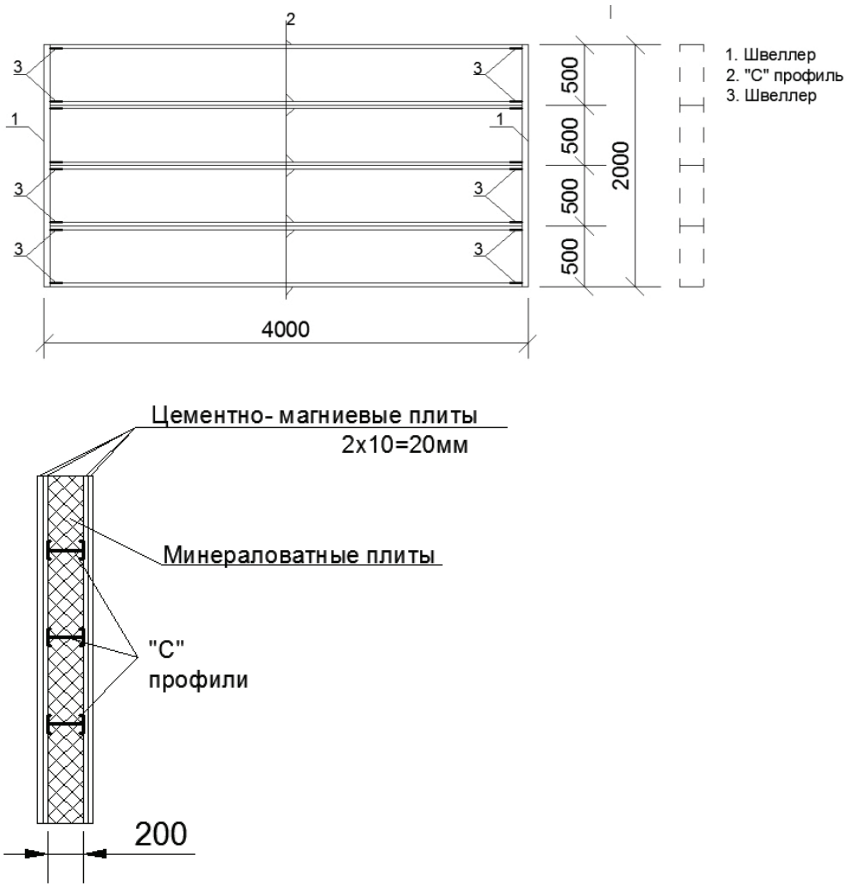


Рисунок 1. Эскиз конструкции опытного образца фрагмента междуэтажного перекрытия

Крепеж цементно-магниевых плит осуществлялся с помощью самонарезающих шурупов, устанавливаемых с шагом 300±10 мм. Стыки между отдельными листами по слоям располагались «вразбежку». Заделка стыков между цементно-магниевыми плитами, а также места установки крепежных винтов производилась шпаклевкой.

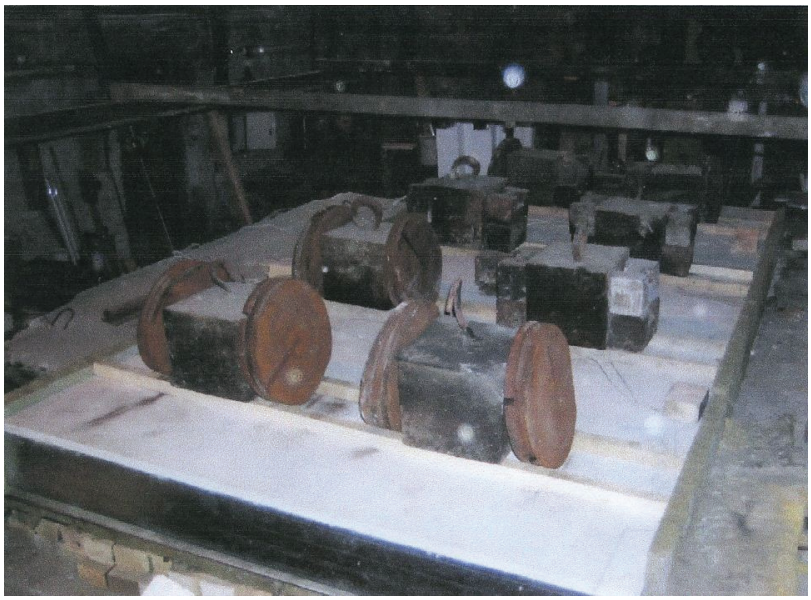


Рисунок 2. Опытный образец № 1 с приложенной равномерно-распределенной нагрузкой перед испытанием

Заполнение внутренней части фрагмента междуэтажного перекрытия выполнялось теплоизоляционными плитами из минеральной ваты плотностью 100±10% кг/м^3, ТУ 5762-003-45757203-99 с изм. 1, относящихся к негорючим материалам (НГ). Толщина слоя теплоизоляции составляла 200 мм.

Влажность цементно-магниевых плит, установленных на опытных образцах, соответствовала требованиям, изложенным в ГОСТ 30247.0 п. 7.3.

Подготовленный к испытаниям опытный образец №1 с приложенной равномерно распределенной нагрузкой представлен на рис. 2.

Процесс испытаний

Опытные образцы устанавливались на экспериментальную установку и подвергались одностороннему тепловому воздействию по стандартному температурному режиму согласно ГОСТ 30247.0.

Испытания проводились под действием постоянной равномерно-распределенной нагрузки, равной 300 кгс/м^2 (без учета собственного веса).

Нагружение опытных образцов осуществлялось чугунными грузами весом 200, 25 и 16 кгс, которые размещали равномерно на необогреваемой поверхности фрагментов междуэтажного перекрытия.

Опытные образцы опирались на шарнирно-неподвижную и шарнирно-подвижную опоры. Расстояние от торцов плит до шарнирных опор составило 80 мм.

Прогибы образцов в середине пролетов, в ходе нагружения и в процессе испытания, измеряли приборами Максимова. Прогиб опытных образцов фрагмента панели перекрытия после нагружения составил у первого образца 4,0 мм, у второго – 3,9 мм.

Температура в огневой камере печи измерялась печными термопарами, равномерно распределенными по длине образца в шести местах, а на опытных образцах температура измерялась термопарами типа ТХА, установленными в количестве 5 штук на необогреваемой поверхности образца в соответствии с требованиями, изложенными в ГОСТ 30247.1 п. 7.3.1.

Основные результаты испытаний

На 7-й мин. испытания 1-го образца и на 8-й мин. испытания 2-го образца наблюдалось провисание и раскрытие в швах 1-го (наружного) слоя цементно-магниевых плит. На 10-й мин. испытания обоих опытных образцов наблюдалось частичное обрушение 1-го слоя, а также провисание и раскрытие в швах 2-го (внутреннего) слоя цементно-магниевых плит. На 35-37-й мин. испытания наблюдалось частичное обрушение 2-го внутреннего слоя цементно-магниевых плит (см. рис. 3). [1] Начиная с 38-й мин. испытания обоих опытных образцов наблюдалось постепенное обрушение оставшегося 2-го (внутреннего) слоя цементно-магниевых плит и постепенное выпадение слоя минераловатного утеплителя.

На 48-й мин. испытания 1-го и на 46-й мин. испытания 2-го опытные образцы фрагмента междуэтажного перекрытия перешли в предельное состояние, характеризуемое быстрым нарастанием прогиба и последующим обрушением опытных образцов.

Предел огнестойкости опытных образцов фрагмента междуэтажного перекрытия был, достигнут по признаку потери несущей способности на 48-й и 46-й мин. испытания (1-й и 2-й образец соответственно), вследствие достижения предельных деформаций и последующего обрушения образцов.

Средняя температура на необогреваемой поверхности (на момент обрушения образцов) составила 62 и 65°С у 1-го и 2-го образца соответственно.

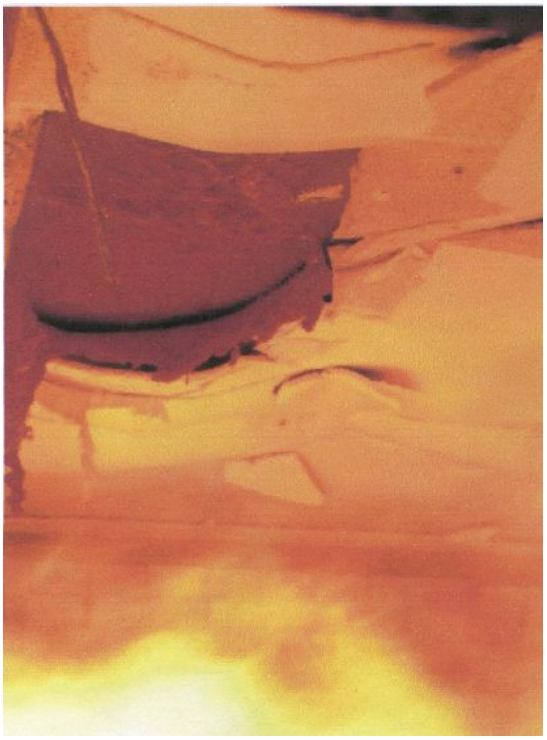


Рисунок 3. Частичное обрушение 2-го (внутреннего) слоя цементно-магниевых плит (образец № 2, вид в смотровое окно)

Повышения температуры на необогреваемой поверхности опытных образцов фрагмента междуэтажного перекрытия в одной из контролируемых точек в сравнении с температурой до испытания более чем на 180°С (196°С) за время проведения испытаний не зафиксировано. [6]

Кривые изменения температур и прогибов, опытных образцов фрагмента междуэтажного перекрытия представлены на рис. 4. [1]

На момент достижения опытными образцами предельного состояния по признаку потери несущей способности, образования сквозных трещин или отверстий на необогреваемой поверхности не зафиксировано. [1]

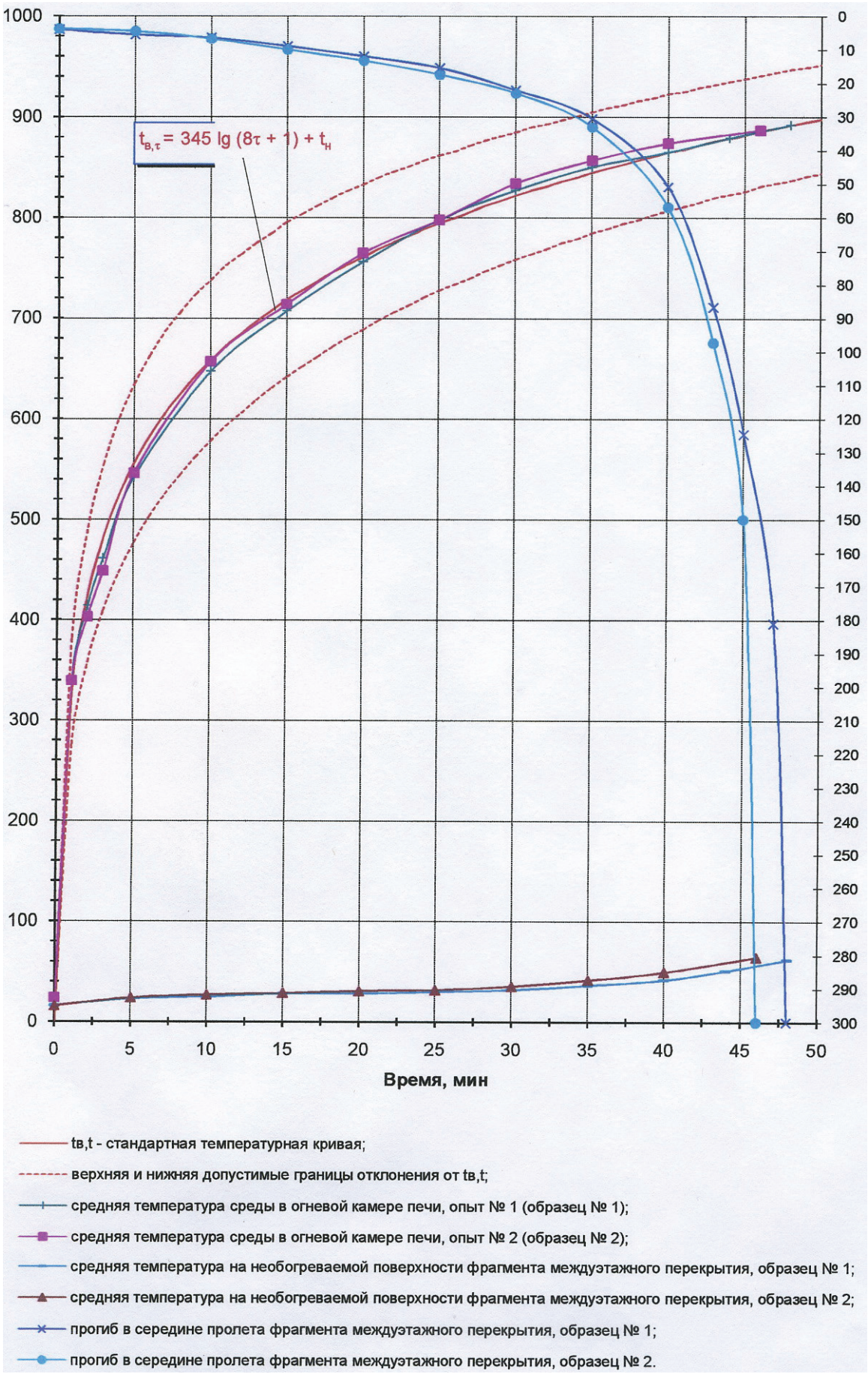


Рисунок 4. Кривые изменения температур и прогибов опытных образцов фрагмента междуэтажного перекрытия

Предел огнестойкости фрагмента междуэтажного перекрытия, выполненного на основе стального каркаса из тонколистовых оцинкованных холодногнутых профилей ТУ 1121-006-23135079-2007 с обшивкой цементно-магниевыми листами и с заполнением внутренней части теплоизоляционными плитами из минеральной ваты, испытанного под действием равномерно-распределенной нагрузки равной 300 кгс/м^2 (без учета собственного веса), составляет 47 мин., что соответствует классификации REI 45 по ГОСТ 30247.0.

Огнестойкость такого вида перекрытия ниже, чем у сталебетонного перекрытия с применением профилированных настилов, у которого пожароустойчивость достигает 90 мин.

Также оно обладает меньшей стойкостью к огню, чем безбалочное железобетонное перекрытие, которое соответствует классификации REI 150.

Опираясь на Технический регламент о требованиях пожарной безопасности и СНиП 21.01-97, представленное междуэтажное перекрытие отвечает II- III степени огнестойкости REI 45.

В соответствии со СНиП 2.08.02-89 «Общественные здания и сооружения», здания с III степенью огнестойкости могут иметь до 5 этажей площадью не более 2000 м^2.

Согласно СНиП 31-02-2001 «Дома жилые одноквартирные» допускается использование перекрытия огнестойкостью REI 45 для жилых одноквартирных домов высотой до 3 этажей при площади одного этажа до 150 м^2. При этом класс конструктивной пожарной опасности дома должен быть не ниже С2. Также возможно использование и в 4-хэтажных жилых домах. Но при этом должен быть достигнут класс конструктивной пожарной опасности не ниже С1.

Итак, по полученным результатам, можно сделать вывод, что рациональнее всего будет использование междуэтажных перекрытий на основе стальных тонколистовых профилей в малоэтажных коттеджах, где оно будет удовлетворять всем нормативным требованиям. Также возможно использование в более высоких зданиях, но при этом придется повышать класс конструктивной пожарной опасности здания.

Литература

1. Отчет об испытаниях на пожарную прочность. Огнестойкость фрагмента междуэтажного перекрытия выполненного на основе стального каркаса из тонколистовых оцинкованных холодногнутых профилей ТУ 1121-006-23135079-2007 с обшивкой цементно-магниевыми плитами марки "УНИПРОК-НГ" и с заполнением внутренней части теплоизоляционными плитами из минеральной ваты ВЕНТИ БАТТС ТУ 5762-003-45757203-99 с изм. 1 / ФГУ ВНИИПО. – М., 2009. – 12 с.
2. Федеральный закон РФ от 22 июля 2008 года N123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»
3. Айрумян Э.Л., Каменщиков Н.И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения // Мир строительства и недвижимости. – 2006. – №36. – С. 9-11.
4. Белый Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Межвуз. темат. сб. тр. – №42 (Строительная механика сооружений). – Л. : ЛИСИ, 1983. – С. 40-48.
5. Ватин Н.И., Попова Е.Н. Термопрофиль в легких стальных тонкостенных конструкциях. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – 63 с.
6. Золотов С.И. О противопожарных преградах // Строительство и недвижимость. – 2001. - №31. С. 3-5.
7. Кузьменко Д.В., Ватин Н.И. Ограждающая конструкция «нулевой» толщины – термопанель // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – №1. С. 13-21.
8. Смазнов Д.Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №3(5). – С. 42-49.
9. Мейнцер С.В. Быстровозводимые здания промышленного назначения // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №6(8). – С. 9-11.
10. Назмеева Т.В. Обеспечение пространственной жесткости покрытия в зданиях из ЛСТК // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №6(8). – С. 12-15.
11. Ватин Н.И., Володин В.В., Золотарева Е.А., Петров К.В., Жмарин Е.Н. Реконструкция крыш Санкт-Петербурга на основе легких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №2(12). – С. 59-64.

** Владимир Александрович Рыбаков, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(964)331-29-15; эл. почта: fishermanoff@mail.ru

Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде «SCAD Office»[1]

К.т.н., доцент В. В. Юрченко*,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Сегодня на отечественный рынок металлоконструкций активно импортируются легкие строительные конструкции из тонкостенных холодногнутых профилей, которые нашли широкое применение в строительной индустрии в каркасных зданиях и сооружениях различного назначения [6].

Характерными чертами легких стальных тонкостенных конструкций являются: малая металлоемкость, высокая технологичность и приспособленность для изготовления на потоковых автоматизированных линиях, транспортировки, а также для конвейерно-блочных и других ускоренных методов монтажа; высокая степень заводской готовности, возможность комплектной поставки целых модульных зданий или их несущих элементов.

Использование легких стальных конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей в строительной практике имеет, безусловно, целый ряд преимуществ, обусловленных, прежде всего, легкостью этих конструкций, и связанным с этим понижением транспортных расходов, сокращением сроков строительства, минимальным использованием строительных машин. В качестве недостатков можно отметить более высокую вероятность повреждения таких конструкций при транспортировании, погрузочно-разгрузочных работах и на монтаже.

Внедрение в практику строительства конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей является актуальным и экономически обоснованным. Известен ряд областей применения, где эффективность каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей является наиболее высокой, а именно: жилые одноэтажные здания, в т.ч. коттеджи, здания административного и торгово-бытового назначения, крытые спортивные сооружения, торгово-выставочные павильоны, автомастерские, автозаправочные станции, бескрановые производственные цеха, склады, ангары, фермы, овощехранилища, оранжереи, теплицы [2].

Однако широкое использование конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей отечественного производства задерживается, прежде всего, из-за несовершенства отечественной нормативной базы и недостаточного опыта экономического и надежного проектирования таких конструкций.

Деформирование и распределение напряжений в обычных стержнях и в тонкостенных стержнях открытого профиля существенно различаются, поскольку для последних не выполняются (полностью или частично) гипотеза плоских сечений Эйлера-Бернулли и принцип локальности действия взаимно уравновешенной системы сил Сен-Венана. В тонкостенных стержнях открытого профиля происходит значительная депланация сечений, что существенно отображается на условиях их работы под нагрузкой [8, 9].

При нагружении тонкостенного стержня открытого профиля из-за стеснения депланации сечения появляются дополнительные секториальные напряжения, которые вносят значительный вклад в суммарные напряжения, существенно увеличивая или же уменьшая их. Именно недостаточной изученностью вопроса относительно влияния стесненного кручения на несущую способность конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей можно объяснить тот факт, что в Рекомендациях [1], разработанных ЦНИИПСК им. Мельникова, было резко ограничено расчетное сопротивление стали, принятое в размере 75% (в некоторых случаях 80%) от нормативной границы текучести.

Статический анализ и определение внутренних усилий в элементах конструкции из тонкостенных холодногнутых стержней открытого профиля при учете стесненного кручения является сложной задачей. В современных вычислительных программных комплексах используются типы конечных элементов, которые позволяют учесть до шести степеней свободы в узлах стержневой системы, соответствующие линейным перемещениям и поворотам в этих узлах как жестких тел. В то же время, теория тонкостенных стержней открытого профиля требует введения седьмой степени свободы в узлах, примыкающих к тонкостенному стержню [7, 14]. Эта седьмая степень свободы и отвечает за депланационную составляющую узлового перемещения (рис. 1).

Расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля может выполняться при использовании оболочечных конечных элементов. Однако это требует тщательного выбора сетки конечных элементов, с помощью которой описываются элементы конструкции. При этом, соответственно, количество узлов и элементов увеличивается по сравнению со стержневой аппроксимацией на несколько порядков [14].

[1] С глубокой признательностью Э. З. Криксунову и А. В. Перельмутеру (SCAD Soft, Киев) за советы и конструктивные замечания относительно данной работы

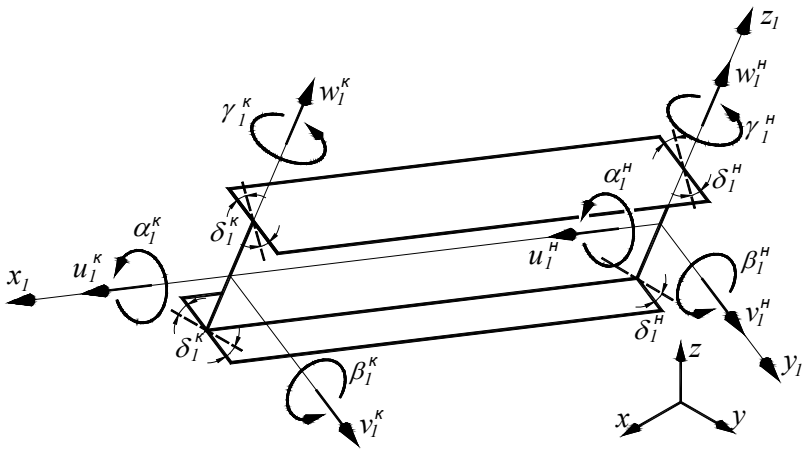
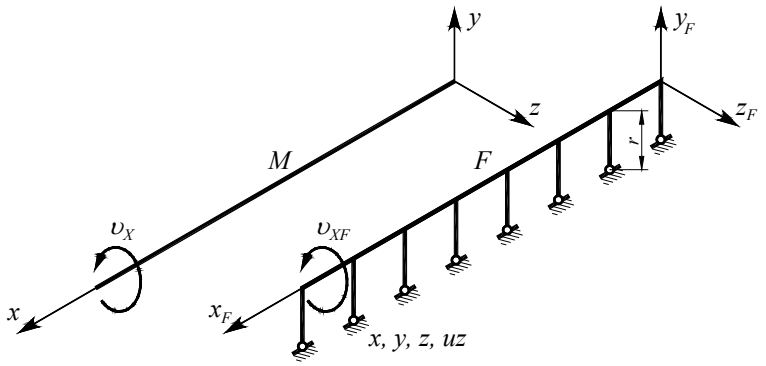


Рисунок 1. Конечно-элементная модель тонкостенного стержня [14]

Для расчета стержневых конструкций, состоящих из тонкостенных стержней открытого профиля, с использованием вычислительного комплекса SCAD [10], можно воспользоваться аппроксимацией каждого стержня двумя стержнями (основным и фиктивным), которые рассматривается в классической постановке, то есть такими, которые соответствуют теории Бернулли-Эйлера для стержней сплошного сечения, и поэтому не требуют введения в расчетную схему каких-либо дополнительных степеней свободы. Между перемещениями поперечных сечений основного и фиктивного стержней устанавливается связь, обеспечивающая равенство углов поворотов сечений относительно их продольной оси: $\theta_x = \theta_{xF}$. Кроме того, на перемещения фиктивного стержня накладывается система внешних связей (рис. 2). Подробно о принципах построения бистержневой модели конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля изложено в книге [12]. Там же показано, что построенная бистержневая модель энергетически эквивалентна исходному тонкостенному стержню.



$$EI_{yF} = \frac{EI_\omega}{r^2}$$

$$\theta_x = \theta_{xF}$$

$$M_{yF} = -EI_{yF}\left(\omega_F\right)''$$

$$B = M_{yF} r$$

$$M_\omega = Q_{zF} r$$

Рисунок 2. Бистержневая модель тонкостенного стержня

При таком подходе внутренние усилия в фиктивном стержне можно интерпретировать как обобщенные усилия в исходном тонкостенном стержне, возникающие при стесненном кручении. А именно, бимомент B и момент стесненного кручения M_ω совпадают с точностью до множителя *r* соответственно с изгибающим моментом M_{yF} и поперечной силой Q_{zF}, которые возникают в фиктивном стержне.

Исследованию проблемы устойчивости несущих элементов из тонкостенных холодногнутых профилей посвящены работы [4, 5, 16].

Критические напряжения для различных форм потери устойчивости тонкостенного стержня открытого профиля могут быть определены с использованием оболочечной модели в среде вычислительного комплекса SCAD [10], реализующего метод конечных элементов. При этом задача устойчивости рассматривается в своей классической постановке как для упругой системы в предположении, что все приложенные к конструкции внешние нагрузки (а соответственно, и внутренние усилия) увеличиваются пропорционально одному и тому же параметру λ. Те значения параметра λ, при котором матрица жесткости конструкции впервые перестает быть положительно определенной, является критическим, а соответствующее значение параметра λ являетя коэффициентом запаса устойчивости [13, 19]. Так, решение задачи упругого выпучивания С-образного тонкостенного стержня выполнено в работе [11] и представлено на рис. 3.

Как видно из рис. 3, кроме привычных местной и общей форм потери устойчивости (по изгибной и изгибно-крутильной формам), рассматривается также специальная форма потери устойчивости (т.н. потеря устойчивости формы поперечного сечения или же потеря устойчивости вследствие искажения поперечного сечения), которая характерна для тонкостенных стержней открытого профиля.

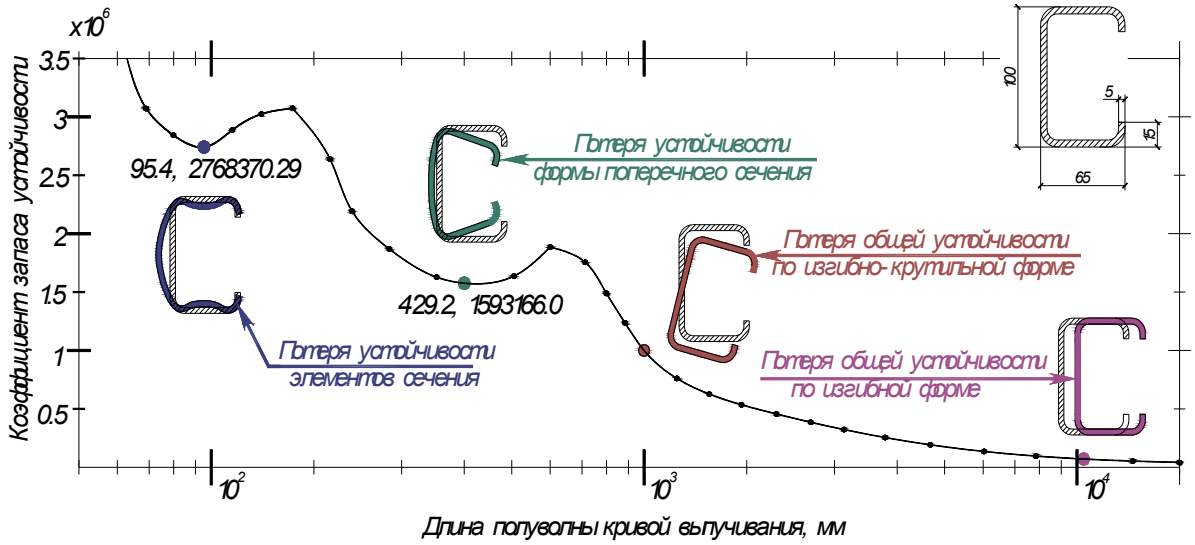


Рисунок 3. Решение задачи устойчивости С-образного тонкостенного стержня с использованием оболочечной модели

Характерной особенностью несущих элементов из тонкостенных холодногнутых профилей является возможность их закритической работы (после потери местной устойчивости сжатых элементов сечения, а также после потери устойчивости формы поперечного сечения). Потеря местной устойчивости тонкой подкрепленной пластины, представляющей собой элемент сечения, приводит к неравномерному распределению нормальных напряжений в сечении такой пластины, которое характеризуется концентрацией нормальных напряжений возле подкрепленных краев пластины, т.е. фактически, в местах сопряжения тонких пластин, из которых состоит сечение (рис. 4). При вычислении несущей способности поперечного сечения тонкостенного элемента используется концепция «эффективной ширины» элемента [18] (рис. 5), впервые предложенная фон Карманом еще в 1932 году [20].

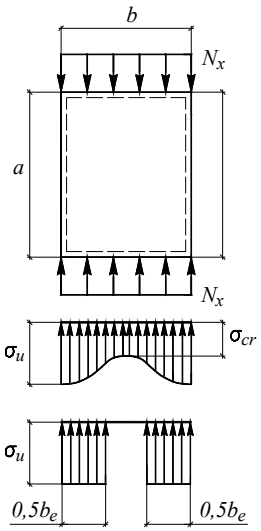


Рисунок 4. Неравномерное распределение нормальных напряжений в сечении пластины вследствие потери устойчивости

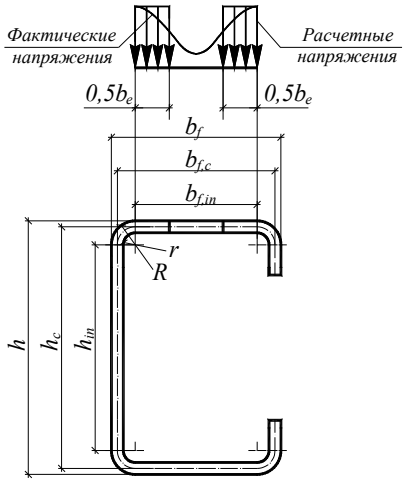


Рисунок 5. Эффективная ширина сжатой полки С-образного элемента

В более полной мере вопрос расчета и проектирования несущих элементов из тонкостенных холодногнутых сечений открытого профиля отражен в Европейских нормах проектирования [17]. Они регламентируют выполнять проверки прочности и устойчивости таких элементов с использованием эффективных (уменьшенных) размеров сечений, учитывающих как возможность местной потери устойчивости сжатых элементов сечения, так и потерю устойчивости формы поперечного сечения (рис. 6, 7).

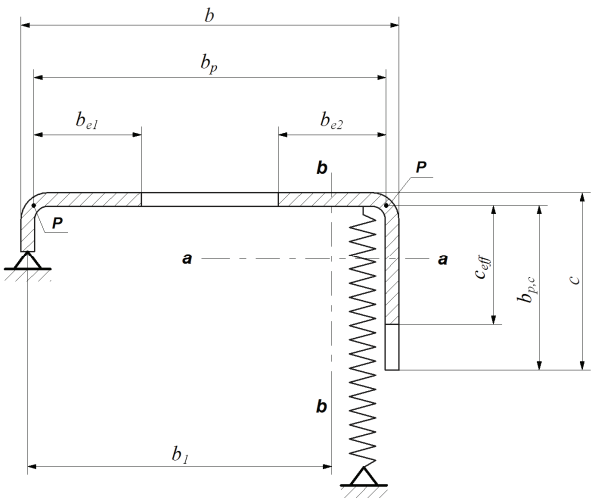


Рисунок 6. Расчетная схема полки с отгибом согласно EC3

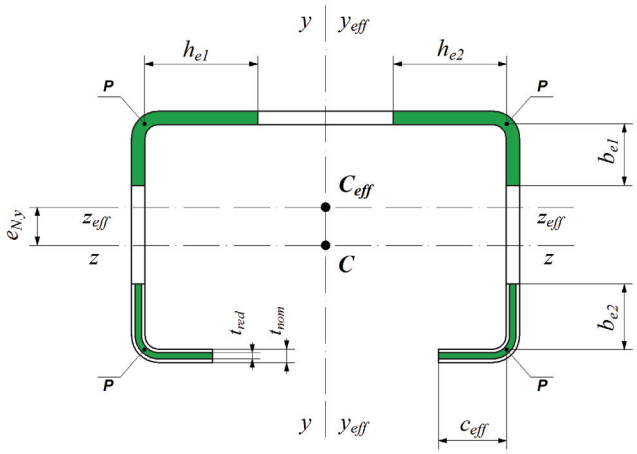


Рисунок 7. Эффективное поперечное сечение С-образного профиля согласно EC3

Ниже приведен расчет каркаса здания из тонкостенных холодногнутых профилей при помощи программы SCAD на примере типового здания склада компании Llentabhallen Sp.z.o.o. (рис. 8).

Рисунок 8. Типовое здание склада компании Llentabhallen Sp.z.o.o.

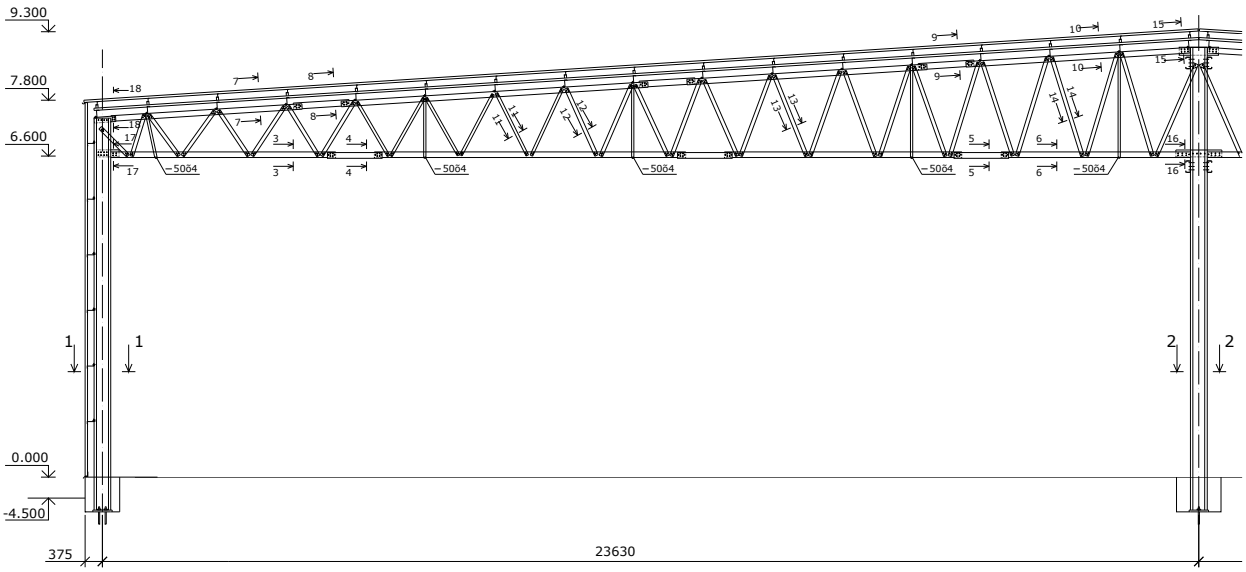


Рисунок 9. Конструктивная схема поперечной рамы каркаса здания

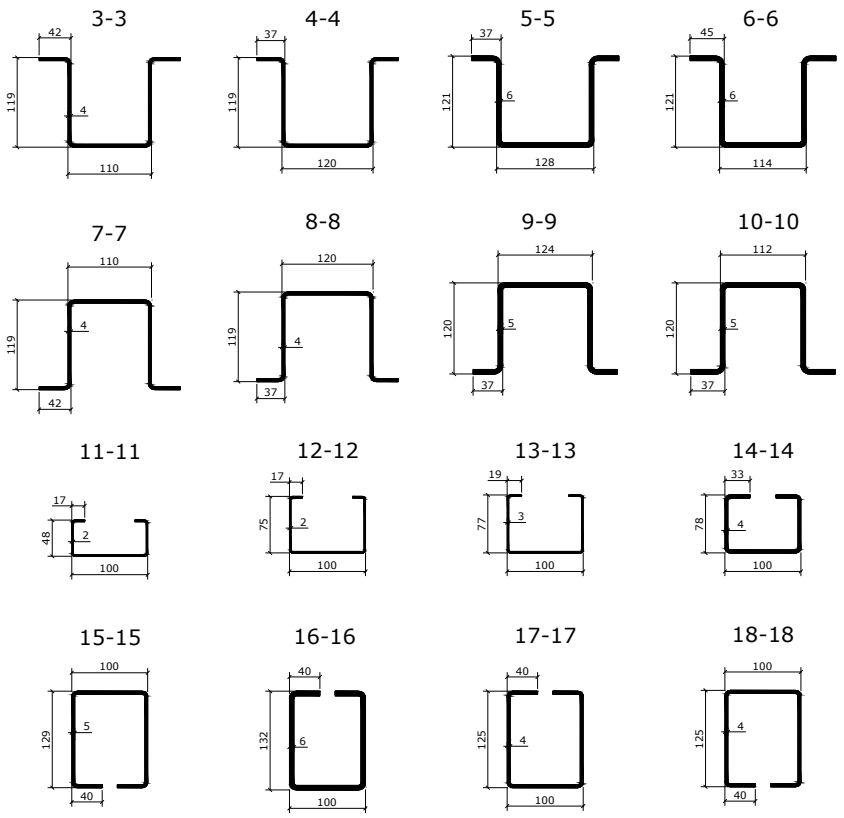


Рисунок 10. Типы и размеры поперечных сечений несущих элементов решетчатого ригеля

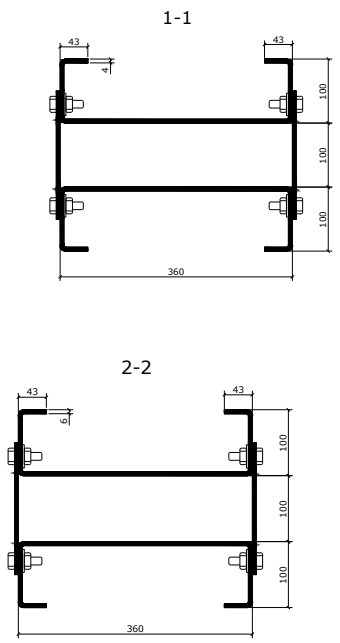


Рисунок 11. Типы и размеры поперечных сечений колон каркаса

Основными несущими конструкциями здания служат двухпролетные поперечные рамы общим пролетом 48 м, шаг поперечных рам составляет 6 м (рис. 9). Ригели поперечных рам запроектированы в форме двускатных трапециевидных ферм. Высота зданий составляет 7,8 м – на уровне карнизного узла рамы, и 9,3 м – на уровне конькового узла.

Все несущие элементы поперечных рам зданий запроектированы из тонкостенных холодногнутых профилей С-образного и корытообразного сечений (рис. 10, 11). Кровельные прогоны в проекте здания приняты из Z-образных холодногнутых оцинкованных профилей высотой 150 мм, которые размещены с шагом в плане 1,5 м.

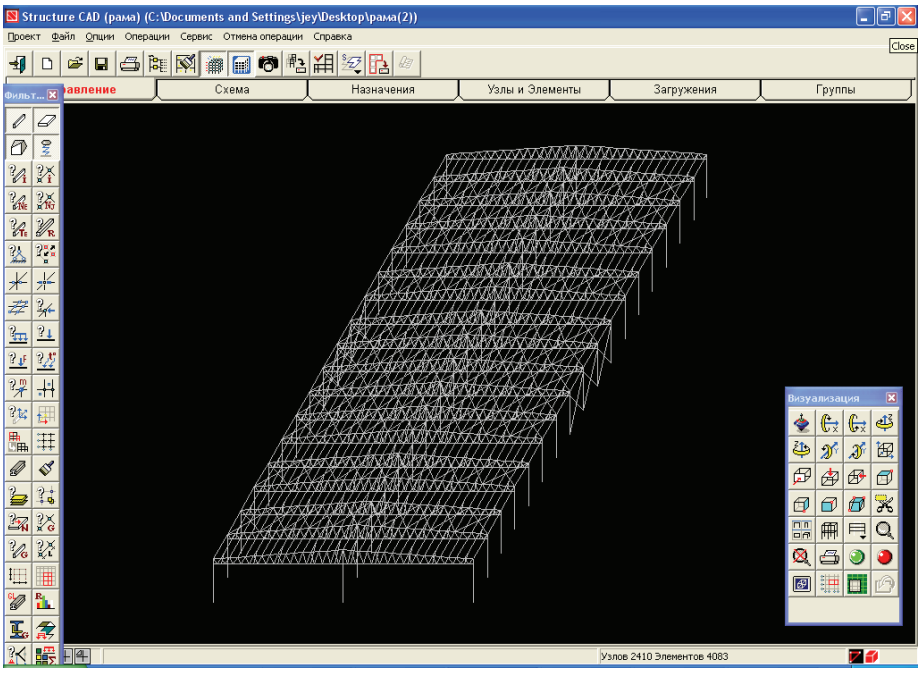


Рисунок 12. Трехмерная конечно-элементная модель каркаса здания

Анализ напряженно-деформированного состояния каркаса здания из тонкостенных холодногнутых профилей выполнялся при помощи программы SCAD [10] с использованием трехмерной конечно-элементной модели (рис. 12).

Расчетная схема сквозного ригеля поперечной рамы каркаса здания была принята с неразрезными поясами и элементами решетки, которые шарнирно примыкают к узлам верхнего и нижнего пояса фермы (рис. 13).

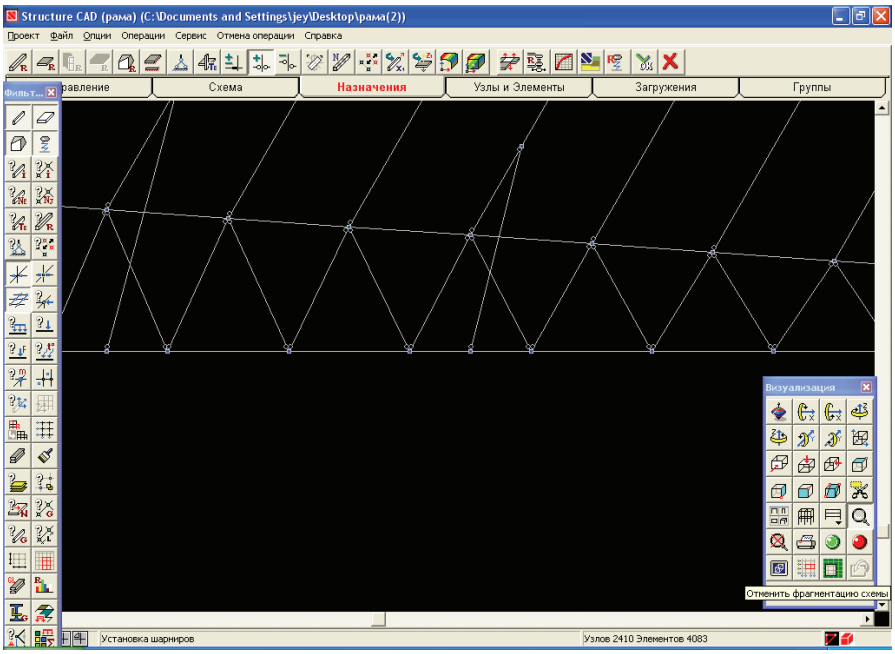


Рисунок 13. Расчетная схема решетчатого ригеля поперечных рам каркаса

Следует отметить, что использование тонкостенных холодногнутых профилей в качестве стеновых и кровельных прогонов за рубежом является общепризнанным стандартом. При этом, максимальная эффективность таких профилей при пролетах до 10 м достигается за счет их проектирования по неразрезной схеме, что конструктивно осуществляется сопряжением прогонов по длине при помощи нахлесточного соединения на болтах. Нахлест прогонов осуществляется в местах крепления прогонов к ригелям поперечных рам, т.е. в расчетных сечениях, где возникают наибольшие изгибающие моменты.

Для моделирования опирания неразрезных прогонов шарнирно сверху на верхний пояс фермы, удобно воспользоваться объединением перемещений опорных узлов прогонов и соответствующих узлов верхнего пояса ферм (рис. 14, 15).

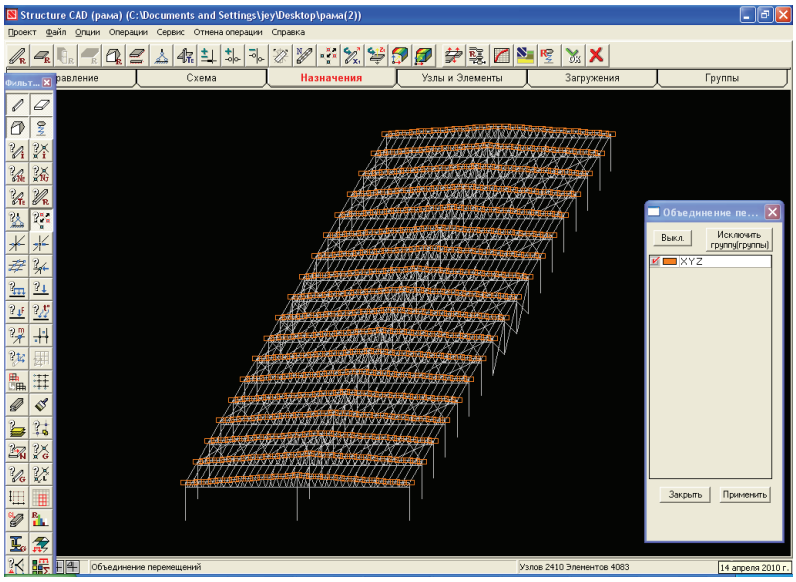


Рисунок 14. Трехмерная конечно-элементная модель каркаса здания с использованием объединений перемещений в опорных узлах прогонов покрытия и в узлах верхнего пояса решетчатых ригелей

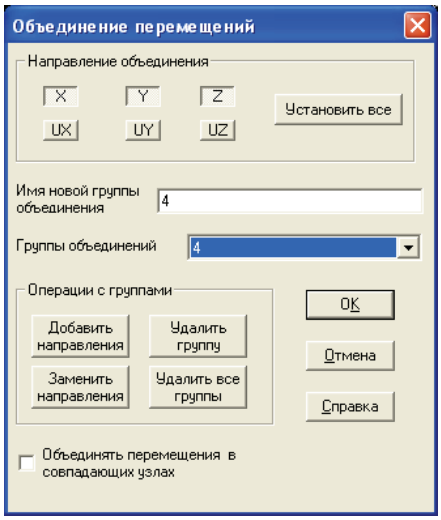


Рисунок 15. Параметры объединения перемещений

Пространственная жесткость и геометрическая неизменяемость каркаса здания обеспечивается устройством по длине здания жестких блоков, создаваемых путем раскрепления двух соседних рам между собой системой связей. Горизонтальные связи по верхним поясам ферм приняты крестовыми, с гибкими раскосами и жесткими распорками, функцию которых выполняют прогоны покрытия. Вертикальные связи между фермами устроены с шагом 4,5 и 6,0 м и конструктивно оформлены в виде подкосов, идущих от прогонов покрытия к нижнему поясу ферм (рис. 16).

Для моделирования гибких элементов связей удобно воспользоваться односторонними двухузловыми связями, которые работают только на растяжение и отключаются при сжатии (рис. 17).

Для определения типов жесткости стержневой системы из тонкостенных холодногнутых профилей использовалась программа ТОНУС [10], предназначенная для формирования тонкостенных сечений и расчета их геометрических характеристик. Программа ТОНУС позволяет рассматривать произвольные (в том числе открыто-замкнутые) профили. Модель тонкостенного поперечного сечений в этом сателлите формируется из полосок путем задания их толщины и определения положения их срединной линии (рис. 18).

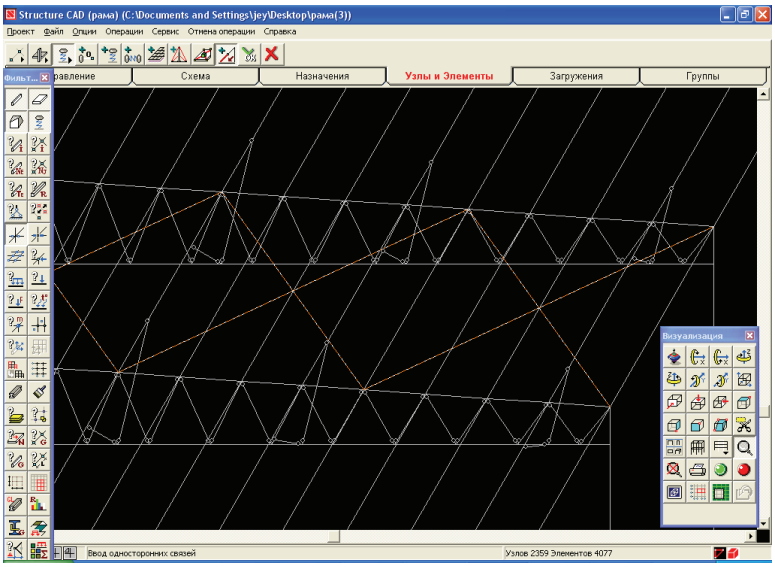


Рисунок 16. Трехмерная конечно-элементная модель каркаса здания с односторонними связями

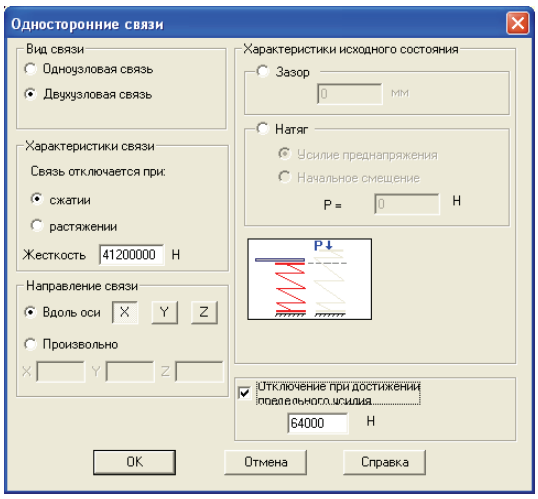


Рисунок 17. Параметры односторонних связей

Для созданного пользователем тонкостенного сечения вычисляются все его геометрические характеристики (рис. 19) При этом, для вычисления координат центра изгиба и секториального момента инерции методом конечных разностей (методом сеток) решается дифференциальное уравнение Лапласа на области сечения с краевыми условиями на границе, зависящими от того, является ли тот или иной участок границы частью внешнего контура или принадлежит внутреннему отверстию.

Необходимо отметить, что геометрические характеристики сечения вычисляются всегда как для сплошностенчатого сечения (т.е. податливость соединительных решеток или планок не учитывается).

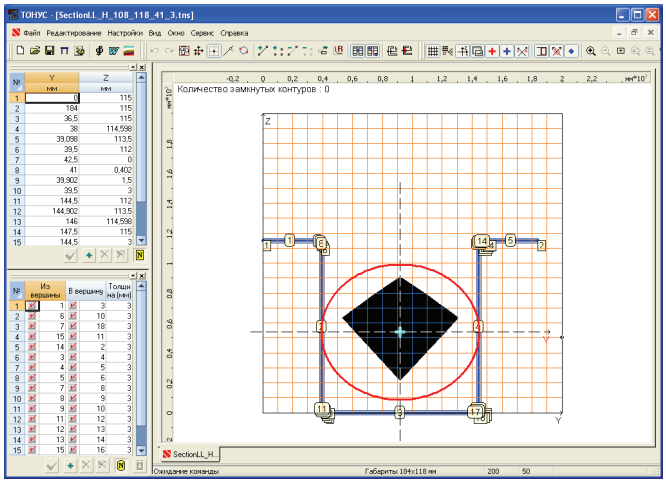
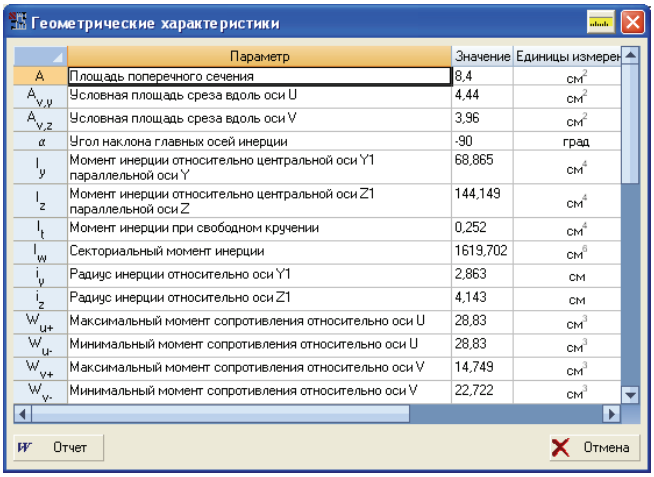


Рисунок 18. Главное окно программы ТОНУС с моделью тонкостенного поперечного сечения



Геометрические характеристики

	Параметр	Значение	Единицы измерен
A	Площадь поперечного сечения	8,4	см^2
$A_{v,y}$	Условная площадь среза вдоль оси U	4,44	см^2
$A_{v,z}$	Условная площадь среза вдоль оси V	3,96	см^2
α	Угол наклона главных осей инерции	-90	град
I_y	Момент инерции относительно центральной оси Y1 параллельной оси Y	68,865	см^4
I_z	Момент инерции относительно центральной оси Z1 параллельной оси Z	144,149	см^4
I_t	Момент инерции при свободном кручении	0,252	см^4
I_w	Секториальный момент инерции	1619,702	см^6
i_y	Радиус инерции относительно оси Y1	2,863	см
i_z	Радиус инерции относительно оси Z1	4,143	см
W_{u+}	Максимальный момент сопротивления относительно оси U	28,83	см^3
W_{u-}	Минимальный момент сопротивления относительно оси U	28,83	см^3
W_{v+}	Максимальный момент сопротивления относительно оси V	14,749	см^3
W_{v-}	Минимальный момент сопротивления относительно оси V	22,722	см^3

Отчет Отмена

Рисунок 19. Результаты работы программы ТОНУС

Понятно, что вычисление геометрических характеристик сечений не является самоцелью. Результаты расчета программы ТОНУС в дальнейшем используются в качестве исходных данных при определении типов жесткости стержневых элементов пространственной модели каркаса здания. При этом, описание типов жесткости может быть выполнено как с помощью численного описания характеристик жесткости, так и с использованием импорта рабочих файлов программы ТОНУС с данными пользовательских сечений (рис. 20).

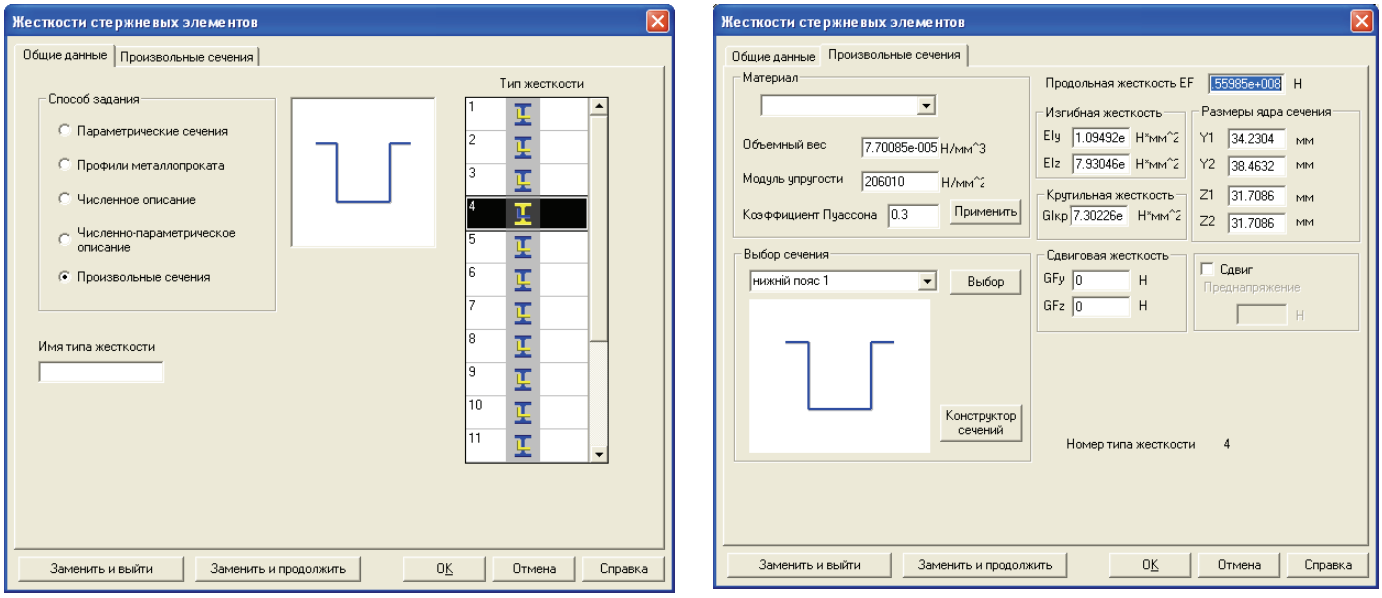


Рисунок 20. Описание типов жесткости конструкции с использованием импорта рабочих файлов программы ТОНУС с данными пользовательских сечений

Статический анализ конечно-элементной модели каркаса здания возвращает набор значений внутренних усилий, действующих в расчетных сечениях несущих элементов каркаса. На базе информации о значениях внутренних усилий в программе ТОНУС определяются нормальные напряжения, и строится поле нормальных напряжений (рис. 21).

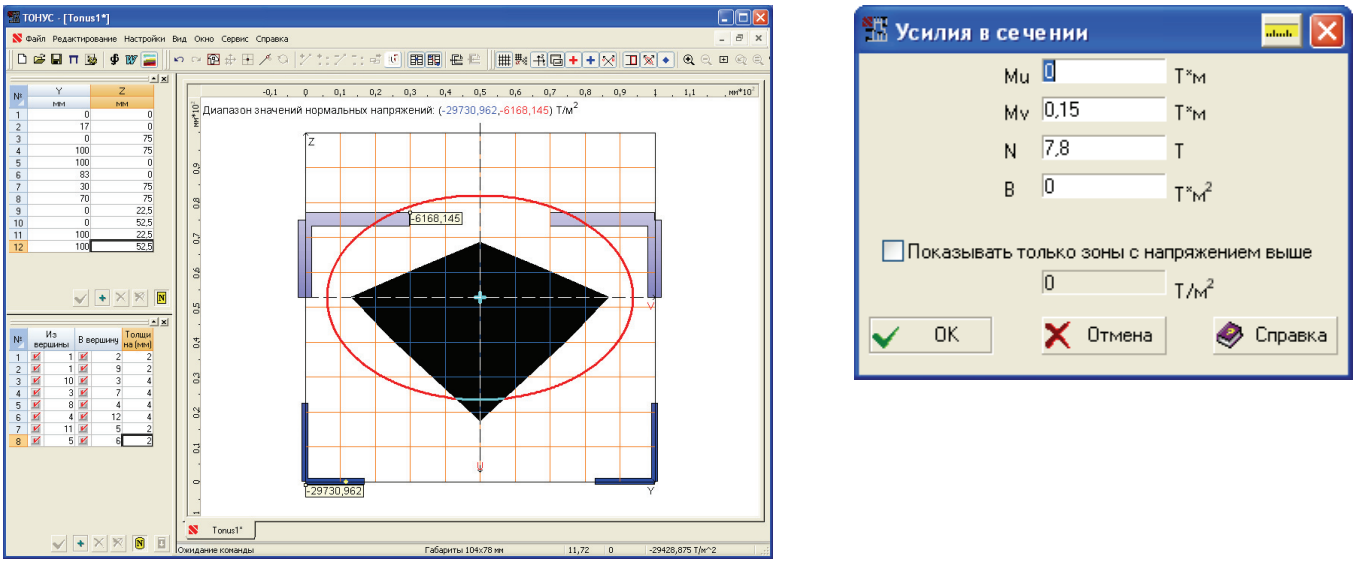


Рисунок 21. Вычисление поля нормальных напряжений для эффективного поперечного сечения тонкостенного стержня

Выводы

Итак, в работе показано, что широкое использование конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей отечественного производства задерживается, прежде всего, вследствие несовершенства нормативной базы и недостаточного отечественного опыта экономического и надежного проектирования таких конструкций.

Уделено внимание вопросу статического анализа и определения внутренних усилий в элементах конструкции из тонкостенных холодногнутых стержней открытого профиля при учете стесненного кручения.

Приведены исследования по проблеме устойчивости несущих элементов из тонкостенных холодногнутых профилей, а также их закритической работы (после потери местной устойчивости сжатых элементов сечения и после потери устойчивости формы поперечного сечения).

В качестве примера приведен расчет каркаса здания из тонкостенных холодногнутых профилей типового здания склада компании Llentabhallen Sp.z.o.o. в среде «SCAD Office», в котором представлены особенности конечно-элементного моделирования таких каркасов, а также их поверочных расчетов.

Литература

1. Айрумян Э. Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутих стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балтпрофиль» / ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 2004. – 64 с.
2. Айрумян Э. Л., Каменщиков Н.И. Рамные конструкции стального каркаса из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий различного назначения // Мир строительства и недвижимости. – 2006. – №36. – С. 9-11.
3. Белов И. Д., Юрченко В. В. Разработка и внедрение эффективных конструкций зданий из тонкостенных холодногнутых профилей: современное состояние проблемы и программа исследований // Сборник научных работ (Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди), выпуск 20. – Ровно : НУВХП, 2010. – С. 364-369. (на украинском языке).
4. Белый Г. И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Межвуз. темат. сб. тр., № 42 (Строительная механика сооружений). – Л. : ЛИСИ, 1983. – С. 40-48.
5. Белый Г. И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме с учетом касательных напряжений деформаций сдвига // Межвуз. темат. сб. тр., № 32 (Металлические конструкции и испытания сооружений). – Л. : ЛИСИ, 1983. – С. 42-48.
6. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – 63 с.
7. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // СтройПРОФИЛЬ. – 2007. – № 2(56). – С. 60-53.
8. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. – М. : Физматгиз, 1959. – 595 с.
9. Джанелидзе Г. Ю., Пановко Я. Г. Статика упругих тонкостенных стержней. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 208 с.
10. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 592 с.
11. Короткий С. В., Юрченко В. В. Определение критических сил для локальных форм упругого выпучивания центрально-сжатых тонкостенных стержней открытого профиля // Сборник тез студенческих докладов. Отв. за выпуск П. П. Лизунов. – Киев : КНУСА, 2009. – С. 164-166 (на украинском языке).
12. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
13. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Том 1. – М. : Издательство SCAD Soft, 2007. – 670 с.
14. Туснин О. Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. – 2009. – №1, т. 15. – С. 73-78. (на украинском языке)
15. Юрченко В. В. Проблема оптимального проектирования поперечных рам каркасов из тонкостенных холодногнутых профилей // Научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов КНУСА: тезы докладов. Ч.1. – Киев : КНУСА, 2009. – С. 44-46. (на украинском языке)
16. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members // Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. – Pp. 179–186.
17. ENV 1993-1-3 EuroCode 3: Design of steel structures. Part 1.3: General rules. Supplementary rules for cold formed thin gaugemembers and sheeting. European Committee for Standardisation CEN. – Brussels, 1996.
18. Koiter, W.T., The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load, Rep. No. 5287, National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands).
19. Sarawit A. T., Kim Y., Bakker M. C. M., Peköz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS, 2001. – Pp. 437-448.
20. von Karman, T., Sechler, E.E., Donnel, L.H., The strength of thin plates in compression, Trans ASME. – 1932. – Vol. 54. – Pp. 53–57.

** Виталина Витальевна Юрченко, г. Киев, Украина*

Тел. раб.: +38-044-244-96-65; эл. почта: vitalinay@rambler.ru

Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих изотропных пластин и оболочек гладко-переменной толщины (асимметричные случаи)

К.т.н., доцент Р.А. Абдикаримов*,
Ташкентский финансовый институт;
К.т.н. В.М. Жгутов**,
ООО «Архитектурно-строительная компания «Китеж»

Тонкостенные пластины и оболочки широко применяются в современном строительстве в качестве элементов как ограждающих, так и несущих конструкций, предназначенных для работы под воздействием значительных силовых нагрузок. Указанные нагрузки могут быть и статическими, и динамическими.

С целью обеспечения в нужных местах требуемой жесткости тонкие пластины или оболочки могут быть подкреплены ребрами, а могут иметь и плавные утолщения. Следовательно, всю конструкцию следует рассматривать как конструкцию переменной (гладко-переменной или же ступенчато-переменной) толщины. Подкрепление пластин или оболочек ребрами делает, как правило, их профили асимметричными. Зачастую асимметрия профилей может иметь место и в случаях их плавных утолщений.

Известно, что тонкостенные элементы допускают достаточно большие прогибы (даже при нагрузках, далеких от своих критических значений). При долго длящихся нагрузках в материале пластин и оболочек может проявиться свойство ползучести (вязкоупругости), что приведет к существенному снижению их несущей способности.

Вне сомнения, что расчеты на прочность, колебания и устойчивость описанных конструкций играют важную роль при проектировании современных зданий и сооружений.

Таким образом, для получения более реальной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) указанных элементов в виде пластин и оболочек необходимо проводить исследования в геометрически нелинейной постановке при совместном учете влияния асимметрии их профилей, а также возможного проявления вязкоупругих свойств материала.

Исследованию устойчивости оболочек постоянной и ступенчато-переменной толщины (асимметричные случаи) в геометрически нелинейной постановке при учете ползучести материала посвящены работы В.М. Жгутова [1–13]. В работах Р.А. Абдикаримова [14–16, 28–29], а также совместной работе Р.А. Абдикаримова и В.М. Жгутова [17] рассмотрены аналогичные задачи о колебаниях и динамической устойчивости вязкоупругих пластин и оболочек гладко-переменной толщины (симметричные случаи).

Тем не менее, поведение асимметричных пластин и оболочек гладко-переменной толщины при совместном учете геометрической нелинейности и вязкоупругих свойств материала в настоящее время исследовано недостаточно и требует дальнейшего изучения.

В свете изложенного разработка новых математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов решения нелинейных динамических задач о колебаниях и устойчивости вязкоупругих систем с гладко-переменной жесткостью (асимметричные случаи) представляется актуальной и важной.

Рассматриваем пологие оболочки на прямоугольном плане (в частности, пластины), а также круговые цилиндрические оболочки.

Некоторую внутреннюю поверхность оболочки принимаем за отсчетную поверхность $z=0$. Координатные линии x и y криволинейной ортогональной системы координат направляем по линиям кривизны, а ось z – по внутренней нормали отсчетной поверхности.

Толщину оболочки задаем ограничивающими ее (в нормальном направлении) гладкими поверхностями $z_B = z_B(x, y)$ и $z_H = z_H(x, y)$ (рис. 1).

Считаем, что оболочка находится под действием механической нагрузки при определенном закреплении ее контура.

Основываясь на кинематической гипотезе Кирхгофа-Лява, учитываем совместно геометрическую нелинейность и возможность развития деформации ползучести (вязкоупругости) в материале. Для описания процесса ползучести используем линейный вариант наследственной теории ползучести.

Математическую модель деформирования оболочки (пластины) понимаем как совокупность:

- геометрических соотношений (выражений деформаций через перемещения);
- физических соотношений (связи напряжений и деформаций);
- функционала полной энергии деформации (или действия), условие стационарности которого эквивалентно уравнениям равновесия или движения.

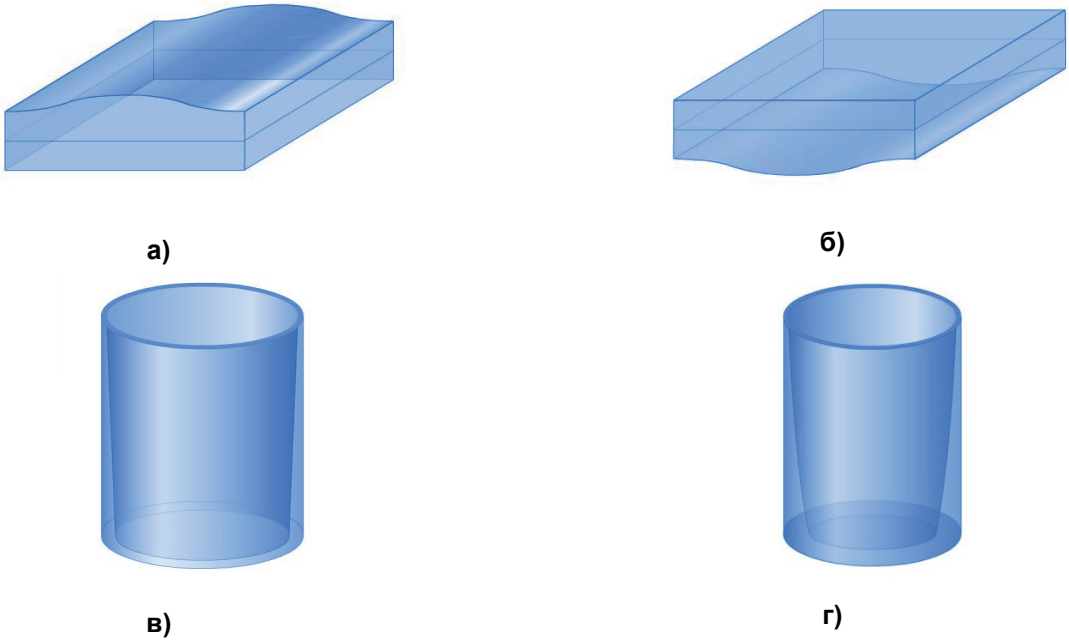


Рисунок 1. Примеры пластин и оболочек гладко-переменной толщины (асимметричные случаи): а) и б) – пологие оболочки (в частности, пластины); в) и г) – круговые цилиндрические оболочки.

Геометрические соотношения в отсчетной поверхности $z=0$ с учетом геометрической нелинейности имеют вид

$$\varepsilon_x=\frac{\partial u}{\partial x}-k_x w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2,\quad \varepsilon_y=\frac{\partial v}{\partial y}-k_y w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2,\quad \varepsilon_{xy}=\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y},\quad (1)$$

где ε_x, ε_y и ε_{xy} – деформации удлинения вдоль осей x, y и сдвига в касательной плоскости (dx, dy); u, v и w – компоненты вектора перемещений (перемещения) точек вдоль осей x, y и z соответственно; $k_x=1/R_1$ и $k_y=1/R_2$ – главные кривизны (R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны) оболочки вдоль осей x и y соответственно.

В случае пластины в соотношениях (1) следует положить $k_x=k_y\equiv 0$; для круговой цилиндрической оболочки (не обязательно пологой) $k_x\equiv 0,\ k_y\equiv 1/R$, где R – радиус цилиндра.

Деформации в слое $z\neq 0$ вычисляем по формулам [2, 4, 5]:

$$\varepsilon_x^z=\varepsilon_x+z\chi_1,\ \varepsilon_y^z=\varepsilon_y+z\chi_2,\ \varepsilon_{xy}^z=\varepsilon_{xy}+2z\chi_{12},$$

где $\chi_1=-\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\chi_2=-\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2}$, $2\chi_{12}=-2\dfrac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}$ суть функции изменения кривизны $[\chi_1=\chi_1(x,y),\chi_2=\chi_2(x,y)]$ и кручения $[\chi_{12}=\chi_{12}(x,y)]$.

Физические соотношения в соответствии с линейным вариантом наследственной теории ползучести для изотропных материалов примем в виде [18 –20]:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}\left(1-\Gamma^*\right)\left(\varepsilon_x^z + \mu\varepsilon_y^z\right),\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}\left(1-\Gamma^*\right)\left(\varepsilon_y^z + \mu\varepsilon_x^z\right),\ \sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\left(1-\Gamma^*\right)\varepsilon_{xy}^z, \quad (2)$$

где E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки;

Γ^* – интегральный оператор с ядром релаксации $\Gamma(t)$, такой, что $\Gamma^*\varepsilon = \int_0^t \Gamma(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau$;

t – время наблюдения; τ – переменная интегрирования (время, предшествующее моменту наблюдения).

Интегрируя напряжения (2) по переменной z в пределах от $z_B = z_B(x,y)$ до $z_H = z_H(x,y)$, получаем выражения для внутренних силовых факторов, приведенных к срединной поверхности оболочки и приходящихся на единицу длины сечения:

- усилия растяжения (сжатия) и сдвига

$$N_x = \int_{z_B}^{z_H}\sigma_x dz = \frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{1-\mu^2}\left[A_0\left(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y\right) + A_1\left(\chi_1 + \mu\chi_2\right)\right],$$

$$N_y = \int_{z_B}^{z_H}\sigma_y dz = \frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{1-\mu^2}\left[A_0\left(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x\right) + A_1\left(\chi_2 + \mu\chi_1\right)\right], \quad (3)$$

$$N_{xy} = \int_{z_B}^{z_H}\sigma_{xy} dz = \frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{2(1-\mu)}\left[A_0\varepsilon_{xy} + 2A_1\chi_{12}\right];$$

- изгибающие и крутящий моменты [18]

$$M_x = \int_{z_b}^{z_H}\sigma_x z dz = \frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{1-\mu^2}\left[A_1\left(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y\right) + A_2\left(\chi_1 + \mu\chi_2\right)\right],$$

$$M_y = \int_{z_b}^{z_H}\sigma_y z dz = \frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{1-\mu^2}\left[A_1\left(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x\right) + A_2\left(\chi_2 + \mu\chi_1\right)\right], \quad (4)$$

$$M_{xy} = \int_{z_b}^{z_H}\sigma_{xy} z dz = \frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{2(1-\mu)}\left[A_1\varepsilon_{xy} + 2A_2\chi_{12}\right].$$

В формулах (3) и (4) $A_0 = \int_{z_b}^{z_H} dz$, $A_1 = \int_{z_b}^{z_H} z dz$ и $A_2 = \int_{z_b}^{z_H} z^2 dz$ – погонные площадь поперечного (продольного) сечения оболочки, статический момент и момент инерции данного сечения соответственно.

Как известно, в случае геометрически нелинейных вязкоупругих задач для оболочек уравнения равновесия или движения, записанные в усилиях и моментах, имеют тот же вид, что и в случае геометрически линейных упругих задач [9, 10, 21, 22].

Поставим выражения (3) и (4) в известные уравнения движения оболочки [9, 10, 18, 23, 24]:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} + p_x - \rho h\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0;\quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + p_y - \rho h\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\partial y} + k_x N_x + k_y N_y + \frac{\partial}{\partial x}\left(N_x\frac{\partial w}{\partial x} + N_{xy}\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \quad (5)$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(N_{xy}\frac{\partial w}{\partial x} + N_y\frac{\partial w}{\partial y}\right) + q - \rho h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0,$$

где $p_x = p_x(x,y,t)$, $p_y = p_y(x,y,t)$ и $q = q(x,y,t)$ – компоненты внешней механической нагрузки;

ρ – плотность материала оболочки (считаем, что в процессе деформирования $\rho \approx const$).

В результате (полагая $p_x = p_x = 0$, $q \neq 0$) получим следующую систему уравнений

$$\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial x}+\mu\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial A_0}{\partial x}(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\varepsilon_{xy}-\right.$$

$$\left.-A_1\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)-\frac{\partial A_1}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)-(1-\mu)\frac{\partial A_1}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right\}-\rho A_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0;$$

$$\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial y}+\mu\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial x}\right)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\varepsilon_{xy}+\frac{\partial A_0}{\partial y}(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)-\right.$$

$$\left.-A_1\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}+\mu\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}\right)-(1-\mu)\frac{\partial A_1}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}-\frac{\partial A_1}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\right\}-\rho A_0\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0; \quad (6)$$

$$\frac{E(1-\Gamma^*)}{1+\mu}\left\{A_1\left(\frac{\partial^2\varepsilon_x}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2\varepsilon_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varepsilon_y}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2\varepsilon_x}{\partial y^2}+(1-\mu)\frac{\partial^2\varepsilon_{xy}}{\partial x\partial y}\right)+\right.$$

$$+2\frac{\partial A_1}{\partial x}\left(\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial x}+\mu\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2}(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)+$$

$$+2\frac{\partial A_1}{\partial y}\left(\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial y}+\mu\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial x}\right)+\frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2}(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)+(1-\mu)\frac{\partial^2 A_1}{\partial x\partial y}\varepsilon_{xy}-$$

$$-\left[A_2\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2\frac{\partial A_2}{\partial x}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)+\right.$$

$$\left.\left.+2\frac{\partial A_2}{\partial y}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^3}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+2(1-\mu)\frac{\partial^2 A_2}{\partial x\partial y}\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y}\right]\right\}-$$

$$-\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{k_x\left[A_0(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\right]+k_y\left[A_0(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\right]\right\}-$$

$$-\frac{\partial w}{\partial x}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial x}+\mu\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial A_0}{\partial x}(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\varepsilon_{xy}-\right.$$

$$\left.-A_1\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)-\frac{\partial A_1}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)-(1-\mu)\frac{\partial A_1}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right\}-$$

$$-\frac{\partial w}{\partial y}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial y}+\mu\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial x}\right)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\varepsilon_{xy}+\frac{\partial A_0}{\partial y}(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)-\right.$$

$$\left.-A_1\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}+\mu\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}\right)-(1-\mu)\frac{\partial A_1}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}-\frac{\partial A_1}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\right\}-$$

$$-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left[A_0(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\right]-$$

$$-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left[A_0(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\right]-$$

$$-2\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left[A_0\varepsilon_{xy}-2A_1\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\rho A_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=q.$$

С учетом (1) система уравнений (6) примет вид

$$\left(1-\Gamma^*\right)\left\{A_0\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\right.$$

$$+\frac{\partial A_0}{\partial x}\left[\frac{\partial u}{\partial x}-\left(k_x+\mu k_y\right)w+\mu\frac{\partial v}{\partial y}++\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)-$$

$$\left.-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)-(1-\mu)\frac{\partial A_1}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}-\frac{\partial A_1}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\right\}-\frac{\left(1-\mu^2\right)}{E}\rho A_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0;$$

$$\left(1-\Gamma^*\right)\left\{A_0\left[\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}-\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\right.\right.$$

$$\left.+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)+$$

$$+\frac{\partial A_0}{\partial y}\left[\frac{\partial v}{\partial y}-\left(k_y+\mu k_x\right)w+\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]-$$

$$\left.-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}\right)-(1-\mu)\frac{\partial A_1}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}-\frac{\partial A_1}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\right\}-\frac{\left(1-\mu^2\right)}{E}\rho A_0\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0; \quad (7)$$

$$\left(1-\Gamma^*\right)\left\{A_2\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2\frac{\partial A_2}{\partial x}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)+\right.$$

$$+2\frac{\partial A_2}{\partial y}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+2(1-\mu)\frac{\partial^2 A_2}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}-A_1\left[\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}-\right.$$

$$-\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^3 v}{\partial y^3}-\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^3 u}{\partial x\partial y^2}+\frac{\partial^3 v}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}+$$

$$\left.+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}+(1-\mu)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^3 w}{\partial y^2}+\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2+\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)^2+(1+\mu)\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)^2\right]+$$

$$+2\frac{\partial A_1}{\partial x}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}-\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\right.$$

$$\left.+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2}\left[\frac{\partial u}{\partial x}+\mu\frac{\partial v}{\partial y}-\left(k_x+\mu k_y\right)w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]+$$

$$+2\frac{\partial A_1}{\partial y}\left[\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}-\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\right.$$

$$\left.+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2}\left[\frac{\partial v}{\partial y}+\mu\frac{\partial u}{\partial x}-\left(k_y+\mu k_x\right)w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]+$$

$$\left.+(1-\mu)\frac{\partial^2 A_1}{\partial x\partial y}\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right]\right\}-\left(1-\Gamma^*\right)\left\{A_0\left[\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial u}{\partial x}+\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial v}{\partial y}-\right.\right.$$

$$\left.-\left(k_x^2+k_y^2+2\mu k_x k_y\right)w+\frac{k_y+\mu k_x}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]-A_1\left[\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\right.$$

$$+\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\Bigg]\Bigg\}-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\left(1-\Gamma^*\right)\Bigg\{A_0\Bigg[\frac{\partial u}{\partial x}+\mu\frac{\partial v}{\partial y}-\left(k_x+\mu k_y\right)w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\Bigg]-$$

$$-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\Bigg\}-\frac{\partial w}{\partial x}\left(1-\Gamma^*\right)\Bigg\{A_0\Bigg[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+$$

$$+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\Bigg]+\frac{\partial A_0}{\partial x}\Bigg[\frac{\partial u}{\partial x}+\mu\frac{\partial v}{\partial y}-\left(k_x+\mu k_y\right)w+$$

$$+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\Bigg]+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)-A_1\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)-$$

$$-\frac{\partial A_1}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)-\left(1-\mu\right)\frac{\partial A_1}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\Bigg\}-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\left(1-\Gamma^*\right)\Bigg\{A_0\Bigg[\frac{\partial u}{\partial y}+\mu\frac{\partial v}{\partial x}-\left(k_y+\mu k_x\right)w+$$

$$+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\Bigg]-A_1\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\Bigg\}-\frac{\partial w}{\partial y}\left(1-\Gamma^*\right)\Bigg\{A_0\Bigg[\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}-\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial w}{\partial y}+$$

$$+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\Bigg]+$$

$$+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)+\frac{\partial A_0}{\partial y}\Bigg[\frac{\partial u}{\partial y}-\left(k_y+\mu k_x\right)w+\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+$$

$$+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\Bigg]-A_1\left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}+\mu\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}\right)-\left(1-\mu\right)\frac{\partial A_1}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}-\frac{\partial A_1}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\Bigg\}-$$

$$-\left(1-\mu\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\left(1-\Gamma^*\right)\Bigg\{A_0\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)-2A_1\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\Bigg\}+\frac{1-\mu^2}{E}\rho A_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=\frac{1-\mu^2}{E}q\,.$$

Следуя [25, 26], можно упростить системы уравнений (6) и (7), введя новую отсчетную поверхность $z_0=z_0(x,y)$ так удачно, чтобы $A_1=0$. В частности, положение поверхности z_0 можно определить из условия:

$$A_1=\int_{Z_B^*}^{Z_H^*}z^*dz^*=0,$$

где $z^*=z-z_0$, $z_H^*=z_H-z_0$, $z_B^*=z_B-z_0$.

Отсюда получим:

$$z_0=\frac{z_H+z_B}{2}.$$

В этом случае при

$$A_0=\int_{Z_B^*}^{Z_H^*}dz^*,\ A_1=0,\ A_2=\int_{Z_B^*}^{Z_H^*}\left(z^*\right)^2dz^* \quad (8)$$

система (6) обретает вид:

$$\frac{E\left(1-\Gamma^*\right)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial x}+\mu\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial A_0}{\partial x}\left(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y\right)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\varepsilon_{xy}\right\}-\rho A_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0;$$

$$\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial y}+\mu\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial x}\right)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\varepsilon_{xy}+\frac{\partial A_0}{\partial y}(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)\right\}-\rho A_0\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0; \quad (9)$$

$$\frac{E(1-\Gamma^*)}{1+\mu}\left[A_2\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2\frac{\partial A_2}{\partial x}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)+\right.$$

$$\left.+2\frac{\partial A_2}{\partial y}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^3}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+2(1-\mu)\frac{\partial^2 A_2}{\partial x\partial y}\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y}\right]-$$

$$-\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}A_0\left[(k_x+\mu k_y)\varepsilon_x+(k_y+\mu k_x)\varepsilon_y\right]-$$

$$-\frac{\partial w}{\partial x}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial x}+\mu\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial A_0}{\partial x}(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\varepsilon_{xy}-\right.$$

$$-\frac{\partial w}{\partial y}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}\left\{A_0\left(\frac{\partial\varepsilon_y}{\partial y}+\mu\frac{\partial\varepsilon_x}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial x}\right)+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\varepsilon_{xy}+\frac{\partial A_0}{\partial y}(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)\right\}-$$

$$-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}A_0(\varepsilon_x+\mu\varepsilon_y)-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}A_0(\varepsilon_y+\mu\varepsilon_x)--2\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\frac{E(1-\Gamma^*)}{1-\mu^2}A_0\varepsilon_{xy}+\rho A_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=q.$$

Система (7) с учетом (8) запишется в виде

$$(1-\Gamma^*)\left\{A_0\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-(k_x+\mu k_y)\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\right.\right.$$

$$\left.+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\frac{\partial A_0}{\partial x}\left[\frac{\partial u}{\partial x}-(k_x+\mu k_y)w+\mu\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\right.$$

$$\left.\left.+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right\}-\frac{(1-\mu^2)}{E}\rho A_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0;$$

$$(1-\Gamma^*)\left\{A_0\left[\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}-(k_y+\mu k_x)\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\right.\right.$$

$$\left.+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right]+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)+$$

$$\left.+\frac{\partial A_0}{\partial y}\left[\frac{\partial v}{\partial y}-(k_y+\mu k_x)w+\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]\right\}-\frac{(1-\mu^2)}{E}\rho A_0\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0; \quad (10)$$

$$(1-\Gamma^*)\left\{A_2\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2\frac{\partial A_2}{\partial x}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}\right)+\right.$$

$$\left.+2\frac{\partial A_2}{\partial y}\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}\right)+\frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+2(1-\mu)\frac{\partial^2 A_2}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right\}-$$

$$-(1-\Gamma^*)A_0\left[(k_x+\mu k_y)\frac{\partial u}{\partial x}+(k_y+\mu k_x)\frac{\partial v}{\partial y}-(k_x^2+k_y^2+2\mu k_x k_y)w+\frac{k_y+\mu k_x}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]$$

$$-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(1-\Gamma^*)A_0\left[\frac{\partial u}{\partial x}+\mu\frac{\partial v}{\partial y}-(k_x+\mu k_y)w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]-$$

$$-\frac{\partial w}{\partial x}\left(1-\Gamma^*\right)\left\{A_0\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-\left(k_x+\mu k_y\right)\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+\right.\right.$$

$$+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\Bigg]+\frac{\partial A_0}{\partial x}\left[\frac{\partial u}{\partial x}+\mu\frac{\partial v}{\partial y}-\left(k_x+\mu k_y\right)w+\right.$$

$$\left.\left.+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial y}\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right]\right\}-$$

$$-\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\left(1-\Gamma^*\right)A_0\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\mu\frac{\partial v}{\partial x}-\left(k_y+\mu k_x\right)w+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]-\frac{\partial w}{\partial y}\left(1-\Gamma^*\right)\left\{A_0\left[\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}-\left(k_y+\mu k_x\right)\frac{\partial w}{\partial y}+\right.\right.$$

$$+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\Bigg]+$$

$$+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial A_0}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)+\frac{\partial A_0}{\partial y}\left[\frac{\partial u}{\partial y}-\left(k_y+\mu k_x\right)w+\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\right.$$

$$\left.\left.+\frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]\right\}-\left(1-\mu\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\left(1-\Gamma^*\right)A_0\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y}\right)+\frac{1-\mu^2}{E}\rho A_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=\frac{1-\mu^2}{E}q.$$

Таким образом, математические модели задач динамики изотропных пластин и оболочек гладко-переменной толщины (асимметричные случаи) при совместном учете геометрической нелинейности и возможном развитии деформаций ползучести (вязкоупругости) построены. Они описываются интегро-дифференциальными уравнениями в частных производных вида (6), (7) и (9), (10).

Соответствующие начальные и граничные условия предполагаются заданными.

Литература

1. Жгутов В.М., Карпов В.В. Анализ развития деформаций ползучести в материале пологих оболочек при длительном нагружении // XVIII сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды: Международная конференция: Материалы международной конференции. Саратов, 27 августа – 1 сентября 2007 года, Сарат. гос. ун-т / Под ред. акад. Н.Ф. Морозова. – Саратов: Изд-во Сарат. гос. ун-та, 2007. – С.121–124.
2. Жгутов В.М. Математические модели и алгоритмы исследования устойчивости пологих ребристых оболочек при учете различных свойств материала // Изв. Орловского гос. техн. ун-та. Сер. «Строительство, транспорт». – 2007.– № 4. – С. 20–23.
3. Жгутов В.М. Уравнения в смешанной форме для ребристых пологих оболочек при учете ползучести материала // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. – № 2.– С. 63–67.
4. Жгутов В.М. Исследование прочности и устойчивости ребристых оболочек с помощью вычислительного эксперимента // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сборник докладов VII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 23-24 апреля 2008 года / Петербургский государственный университет путей сообщения. – СПб., 2008. – 267 с. – С.110–131.
5. Жгутов В.М. Математическая модель и алгоритм исследования прочности и устойчивости ребристых оболочек с учетом различных свойств материала // Инженерные системы – 2008: Всероссийская научно-практическая конференция: Труды конференции. Москва, 7-11 апреля 2008 года, РУДН. – М.: Изд-во РУДН, 2008. – С.341-346.
6. Жгутов В.М. Анализ различных подходов к формированию расчетных уравнений в компьютерном моделировании упруговязких ребристых оболочек // Особенности проектирования и расчета пространственных конструкций на прочность, устойчивость и прогрессирующее разрушение: Научная сессия МОО «Пространственные конструкции» и научного совета РААСН «Пространственные конструкции зданий и сооружений» : Сборник статей. Москва, 14 апреля 2009 года, НИИЖБ. – М. : МОО «Пространственные конструкции», 2009.– С. 34–45.
7. Жгутов В.М. Математическая модель деформирования ортотропных и изотропных ребристых оболочек при учете ползучести материала // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №7. – С. 46 – 54. – Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №7. – С. 46–54. – Доступ в сети Интернет: http://www.engstroy.spb.ru/index_2009_07/zhgoutov1.html.

8. Жгутов В.М. Анализ различных подходов к исследованию ползучести в материале пологих ребристых оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – №1. – С. 4–12.

9. Жгутов В.М. Нелинейные уравнения движения ребристых оболочек с учетом различных свойств материала. I // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 1. – С. 47–54. – Доступ в сети Интернет: http://www.engstroy.spb.ru/index_2010_01/zhgoutov.html.

10. Жгутов В.М. Нелинейные уравнения движения ребристых оболочек с учетом различных свойств материала. II // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 2. – С. 45–48. – Доступ в сети Интернет: http://www.engstroy.spb.ru/index_2010_01/zhgoutov2.html.

11. Жгутов В.М. Математические модели, алгоритм исследования и анализ устойчивости ребристых оболочек с учетом ползучести материала при конечных прогибах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2010.– № 2. – С. 53–59.

12. Жгутов В.М. Устойчивость железобетонных ребристых оболочек при длительных нагрузках // Популярное бетоноведение. – 2010. – № 2. – С 38–46.

13. Жгутов В.М. Устойчивость ребристых оболочек при длительных нагрузках // Инженерно-строительный журнал. – 2010.– № 5. – С. 46 – 54. – Доступ в сети Интернет: http://www.engstroy.spb.ru/index_2010_05/zhgoutov.html.

14. Верлань А.Ф., Абдикаримов Р.А., Эшматов Х. Численное моделирование нелинейных задач динамики вязкоупругих систем с переменной жесткостью // Электронное моделирование.– 2010. – Т. 32. – С.3–14.

15. Абдикаримов Р.А. Численное исследование нелинейного колебания вязкоупругой пластины с переменной жесткостью // Проблемы архитектуры и строительства. – 2010. – №1. – С.37–42.

16. Абдикаримов Р.А. Математическая модель нелинейного колебания вязкоупругой пластины с переменной жесткостью при различных граничных условиях // Проблемы архитектуры и строительства. – 2010. – №1. – С.44–47.

17. Абдикаримов Р.А., Жгутов В.М. Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих ортотропных пластин и оболочек переменной толщины // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 6. – С. 38–47. Доступ из сети Интернет: http://www.engstroy.spb.ru/index_2010_06/abdikarimov.html.

18. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. – М. : Наука, 1970. – 280 с.

19. Колтунов М.А. К вопросу выбора ядер при решении задач с учетом ползучести и релаксации // Механика полимеров. – 1966. – №4. – С. 483–488.

20. Огибалов П.М., Колтунов М.А. Оболочки и пластины. – М. : Изд–во МГУ, 1967. – 352 с.

21. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.

22. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.

23. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М. : Наука. – 1972. – 432 с.

24. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М. : Высшая школа, 1976. – 276 с.

25. Абросимов А.А., Филиппов В.Н. Исследование НДС пластин переменной толщины в геометрически нелинейной постановке с разными системами аппроксимирующих функций // Прикладная математика и механика: Сборник научных трудов Ульяновского гос.-техн. университета. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – С. 3–8.

26. Добрюха Н.А., Абросимов А.А., Айрапетьянц Г.А. Исследования напряженно-деформируемого состояния гибких пологих оболочек с разными системами аппроксимирующих функций // Молодые ученые – науке и производству: Материалы конференции молодых ученых. Саратов, Саратовский гос.-техн. университет, июнь 2007 года. – Саратов, 2007. – С. 51–53.

27. Abdikarimov R.A. Deterministic Simulations of Nonlinear Vibration of Viscoelastic Elements in Thin-Walled Constructions with Variable Rigidity // 2010 SSA Annual Meeting, USA, March-April 2010. Seismological Research Letters. – Vol.81. – №2. –343 p.

28. Abdikarimov R.A., Khodzhaev D.A. Deterministic Calculation of Dynamic Stability of Viscoelastic Elements in Thin-Walled Constructions with Variable Rigidity // 2010 SSA Annual Meeting, USA, March/April 2010, Seismological Research Letters. – Vol.81. – №2. –343 p.

29. Bykovtsev A.S., Abdikarimov R.A., Bobanazarov Sh.P., Khodzhaev D.A. Nonlinear Vibration and Dynamic Stability of High-Rise Special Structure // 2010 SCEC Annual Meeting, USA, September 11-15, 2010, Proceedings and Abstracts. – Volume XX. – Pp.199–200.

** Рустамхан Алимханович Абдикаримов, г. Ташкент, Узбекистан*

Тел. раб.: +998(71)234-66-41; эл. почта: rabdikarimov@mail.ru

*** Владимир Михайлович Жгутов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)378-20-83; эл. почта: abc_kitezh@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный факультет
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spb.ru.
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов организаций, вступающих в СРО, на курсы повышения квалификации (72 часа)

Код	Наименование программы	Виды работ*
Курсы по строительству		
БС-01	«Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, устройства оснований и фундаментов»	**1,2,3,5**
БС-02	«Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций»	**6,7**
БС-03	«Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций»	**9,10,11**
БС-04	«Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования»	**12,13,14**
БС-05	«Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем»	**15,16,17,18,19**
БС-06	«Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи»	**20,21**
БС-08	«Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ»	**23,24**
БС-11	«Безопасность и качество устройства подземных сооружений»	**27,28**
БС-12	«Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов»	**29**
БС-13	«Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ»	**30**
БС-14	«Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб»	**31**
БС-15	«Осуществление строительного контроля»	**32**
БС-16	«Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций заказчика-застройщика и генерального подрядчика»	**33**
Курсы по проектированию		
БП-01	«Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения»	**1,2,11**
БП-02	«Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений»	**3**
БП-03	«Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения»	**4**
БП-04	«Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения»	**5**
БП-05	«Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений»	**6**
БП-06	«Разработка специальных разделов проектной документации»	**7**
БП-07	«Разработка проектов организации строительства»	**8**
БП-08	«Проектные решения по охране окружающей среды»	**9**
БП-09	«Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности»	**10**
БП-10	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**12**
БП-11	«Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика»	**13**
Курсы по инженерным изысканиям		
И-01	«Инженерно-геодезические изыскания в строительстве»	**1**
И-02	«Инженерно-геологические изыскания в строительстве»	**2,5**
И-03	«Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве»	**3**
И-04	«Инженерно-экологические изыскания в строительстве»	**4**
ПР-09	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**6**
И-05	«Организация работ по инженерным изысканиям»	**7**

***(согласно приказам Минрегионразвития РФ N 624 от 30 декабря 2009 г.)**

По окончании курса слушателю выдается удостоверение о краткосрочном повышении квалификации государственного образца (72 ак. часа)

Для регистрации на курс необходимо выслать заявку на участие, и копию диплома об образовании по телефону/факсу: 8(812) 552-94-60, 535-79-92, , e-mail: stroikursi@mail.ru.

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный факультет
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spb.ru.
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов проектных и строительных организаций,
не имеющих базового профильного высшего образования
на курсы профессиональной переподготовки (от 500 часов)
по направлению «Строительство» по программам:

П-01 «Строительство зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Основы проектирования зданий и сооружений***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций заказчика-застройщика***

П-02 «Экономика и управление в строительстве»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций заказчика-застройщика и генерального подрядчика***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Экономика и ценообразование в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Организация, управление и планирование в строительстве***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы механики жидкости и газа***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем отопления и теплоснабжения***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Электроснабжение и электрооборудование объектов***

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем***
- ***Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD***
- ***Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office***

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Обследование строительных конструкций зданий и сооружений***
- ***Выполнение функций заказчика-застройщика и генерального подрядчика***

По окончании курса слушателю выдается диплом о профессиональной переподготовке государственного образца, дающий право на ведение профессиональной деятельности